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

Aménagement des marais en zone sensible à l' inondation : Cas du marais de MUSASA inondé par la rivière MUSASA en République du Burundi

Ntamuryango, Joël; Sous la direction du : Dr- Ir. Niyongabo Henri

2023-08
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2043

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

République du Burundi

Ministère de l'éducation nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur



Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Année Académique: 2020-2021

Aménagement des marais en zone sensible à l'inondation : Cas du marais de MUSASA inondé par la rivière MUSASA en République du Burundi

Mémoire

Présenté publiquement par :

NTAMURYANGO Joël

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

Soutenu le 21 / 08 / 2023 devant le jury composé de:

Dr- Ir. NZEYIMANA	**Joseph**	**: Président**
Dr- Ir. MVUYEKURE	**Jean Claude**	**: Lecteur principal**
Dr- Ir. NIYONGABO	**Henri**	**: Directeur**

Bujumbura, Août 2023

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

-Dr- Ir. NZEYIMANA Joseph : Président

-Dr- Ir. MVUYEKURE Jean Claude : Lecteur principal

-Dr- Ir. NIYONGABO Henri : Directeur

DEDICACES

A Dieu Tout Puissant ;

A mon regretté père ;

A ma regrettée mère ;

A mes frères et sœurs ;

A mes oncles et tantes ;

A mes cousins et cousines;

A mes neveux et nièces;

A tous mes amis et connaissances.

Je dédie ce travail !

Joël NTAMURYANGO

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je suis très heureux d'exprimer mes vifs remerciements envers toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, a contribué à son aboutissement.

Ce travail est le fruit de beaucoup d'efforts fournis par plusieurs personnes. Qu'elles trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes remerciements au Dr-Ir. Henri NIYONGABO, Promoteur et Directeur de ce travail, qui, malgré ses multiples obligations a accepté de diriger ce travail. Ses conseils et rigueur scientifique m'ont été d'un grand recours.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les enseignants de l'Université du Burundi, des cadres et techniciens du Bureau de Centralisation Géomatique (BCG), Fonds International de Développement Agricole (FIDA) et de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU), qui ont porté leur assistance technique de près ou de loin lors de la recherche des données.

Mes sincères remerciements s'adressent également à la représentation de la République Populaire de Chine au Burundi, qui, sous l'égide de Son Excellence Monsieur l'Ambassadeur Lin Changlin, m'a accordé une assistance financière durant la première année de master ;

Je ne peux pas terminer cette partie sans exprimer ma profonde gratitude à ma regrettée mère et mon regretté père pour leur soutien moral et financier malgré ses modestes moyens de subsistance.

Du fond du cœur, je dis merci à la famille de NIKOBAMYE Pasteur et NTAKIRUTIMANA Etienne pour leur soutien et pour l'amour qu'ils ont manifesté envers moi au cours de mes études.

Je remercie sincèrement l'Eternel, Dieu Tout Puissant, pour la force et la vie qu'il m'a accordé afin de réaliser ce travail. A tous ce qui, de près ou de loin, a contribué à l'aboutissement de ce travail, je dis merci !

RESUME

L'Aménagement des marais est un sujet d'actualité partout dans le monde. En effet, pour atteindre les objectifs du millénaire de lutte contre l'insécurité alimentaire, le monde entier en général et le Burundi en particulier s'applique sur cette problématique. Néanmoins, les zones d'aménagement des marais se trouvent beaucoup de fois dans des zones traversées par des rivières, et pouvant inonder les périmètres irrigués pendant leur saison de crues.

Les conséquences de cette inondation sont graves : les plantes inondées s'étouffent, le rendement agricole se volatilise, c'est le cas présent dans notre zone d'étude. La zone d'étude est traversée par la rivière MUSASA. En plus, l'infrastructure routière de la RN8 traverse ce marais. L'objectif principal du présent mémoire est de protéger cette zone contre les eaux de crues de la rivière MUSASA pour protéger l'infrastructure routière et assurer la faisabilité adéquate de l'irrigation.

Le présent travail est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre passe en revue bibliographique. Le deuxième chapitre traite la notion hydrologique. Le troisième chapitre porte sur l'application des études hydrologiques dans la zone du projet et bilan hydriques du périmètre dominé par la rivière MUSASA. Quant au quatrième chapitre, il est question de proposer de construire un modèle de gestion des ressources d'eau en protégeant l'inondation du marais de MUSASA. Dans la pratique, l'agriculture sera irriguée toute l'année, avec possibilité de 2 saisons culturales par an.

Les résultats obtenus permettent de proposer :

- La construction des digues le long de ce marais en assurant que les infrastructures ne sont pas inondées et l'irrigation se fait adéquatement et réaménager le marais MUSASA et réhabiliter en augmentant le diamètre des buses existantes sur la route traversant ce marais ou utiliser des dalots au lieu des buses ;
- Le calculer des hauteurs de digues et des dalots suivant les débits maximums trouvés sur la rivière MUSASA mais aussi suivant les besoins calculés en eau du marais.
- Recommandation de mettre en place des infrastructures de protection le long du périmètre de 3m de hauteur au niveau des digues pour retenir les eaux des crues de la rivière MUSASA et 4m de hauteur pour le dalot.

Mots clés : Inondation, aménagement, irrigation, digues et dalots.

ABSTRACT

Marsh management is a hot topic all over the world. Indeed, to achieve the millennium goals of combating food insecurity, the whole world in general and Burundi in particular is working on this problem. However, marsh development areas are often found in areas crossed by rivers, and which can flood irrigated areas during their flood season.

The consequences of this flood are serious: flooded plants suffocate, agricultural yields disappear, and this is the case in our study area. The study area is crossed by the MUSASA river. In addition, the RNS road infrastructure crosses this marsh. The main objective of this memorandum is to protect this area against floodwaters of the MUSASA River to protect the road infrastructure and ensure adequate irrigation availability.

This work is divided into four chapters. The first chapter provides a bibliographic review. The second chapter deals with the hydrological concept. The third chapter concerns the application of hydrological studies in the project area and water balance of the area dominated by the MUSASA River. As for the fourth chapter, it is a question of proposing to build a water resources management model by protecting the flooding of the MUSASA marsh. In practice, agriculture will be irrigated all year round, with the possibility of 2 growing seasons per year.

The results obtained make it possible to propose:

- The construction of dykes along this marsh ensuring that infrastructure is not flooded and irrigation is done adequately and redeveloping the MUSASA marsh and rehabilitating by increasing the diameter of existing culverts on the road crossing this marsh or using culverts at location of nozzles:
- The calculation of the heights of dikes and scuppers according to the maximum flow rates found on the MUSASA river but also according to the calculated water needs of the marsh.
- Recommendation to put in place protective infrastructure along the perimeter of 3m height at the level of the dikes to retain flood waters from the MUSASA river and 4m height for the scupper.

Keywords: Flooding, development, irrigation, dikes and culverts.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
SIGLES, NOTATIONS ET ABREVIATIONS ..... **x**
LISTE DES FIGURES ..... **xi**
LISTES DES TABLEAUX ..... **xiii**
AVANT-PROPOS ..... **xv**
0 : INTRODUCTION GENERALE **1**
0.1. Contexte, Problématique et Justification de l'Etude 1
0.1.1. Contexte de l'étude 1
0.1.2. Problématique 2
0.2. Objectifs 4
0.2.1. Objectif global 4
0.2.2. Objectifs spécifiques 4
0.3. Méthodologie envisagée 4
CHAPITRE.I : REVUE DE LA LITTERATURE **6**
I.1.Evolution d'inondation 6
I.1.1. Définition 6
I.1.2. Types d'inondations 7
I.1.3. Causes d'inondations 7
I.2. Conséquences des inondations 8
I.3. Dégâts causés par les inondations 8
CHAPITRE.II : NOTION HYDROLOGIQUE **9**
II.1. Précipitations 9
II.2. Evapotranspiration 11
II.3. Hydrogramme d'un cour d'eau 14
II.4. Notions de calcul du temps de concentration 15
II.5. Hauteur des précipitations 15
II.6. Quelques caractéristiques d'un bassin versant 16

II.7. Forme du réseau hydrographique 19
II.8.Transport solide 19
II.9. Indice de pente 21
II.10. Caractéristique d'un cour d'eau 21
II.11. Equilibre hydrologique 21
II.12. Caractéristiques agro-pédo-géologiques 22
II.12.1. La couverture végétale 22
II.12.2. Le type du sol 22
II.13. Modélisation hydrologique 22
II.14. Détermination du quartile d'une période de retour T 24
II.15. Loi de Gumbel 25
II.16. Détermination de l'hydrogramme des crues 26
II.17. Dalots 28
II.17.1. Description 28
II.17.2. Principe du dimensionnement 29
CHAPITRE III : APPLICATION DES NOTIONS HYDROLOGIQUES DANS LA ZONE DU PROJET 32
III.1. Délimitation du bassin versant 32
III.2. Situation géographique de la zone d'étude 33
III.3. Situation climatologique 35
III.3.1. Climat du Burundi 35
II1.3.2. Pluviométrie 36
III.3.3. Station météorologique de MUSASA 36
III.3.4. Températures 38
III.3.5. Humidité relative de l'air 39
III.3.6. Relief de la rivière MUSASA 40
III.4. Quelques paramètres des hauteurs maximales journalières et annuelles de MUSASA ... 43
III.5. Classement de dix plus grandes hauteurs maxima journalières de la station MUSASA . 43
III.6. Prédétermination de la hauteur du projet par la loi des extrêmes de GUMBEL 44
III.6.1. Choix de la période de retour 44
III.6.2. Résultats sur une période de 100ans 45
III.7. Calcul du temps de concentration 45
III.8. Notion d'un hyétogramme synthétique 45

III.9. Méthode de Huff 46
III.10. Hyétogramme de projet 48
III.11. Débits de crue 50
III.12. Passage de l'Hydrogramme Unitaire en hydrogramme synthétique 51
III.13. Transformation de la pluie brute en hyétogramme de la pluie nette 51
III.14. Décomposition de l'averse pour la situation initiale (SI) d'aménagement du bassin versant MUSASA 52
III.15. Traçage de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA 53
III.16. Résultats de calcul de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA 54
CHAPITRE IV : MODELE DE GESTION DES RESSOURCES D'EAU 58
IV.1. Cadre hydraulique de la zone d'étude 58
IV.2. Zone d'étude 59
IV.3. Délimitation du Marais de MUSASA 59
IV.4. Réseau hydrographique 61
IV.5. Traitement des données et analyses des résultats 62
IV.5.1. Analyse hydro agricole 62
IV.5.2. Gestion des ressources en eaux 63
IV.5.3.Irrigation 63
IV.5.4. Calcul des besoins en eau 63
IV.5.5. La méthode moderne Aquacrop 65
IV.6. Bilan hydrique de la rivière MUSASA 67
IV.6.1. Evaluation comparative des méthodes de calcul des besoins en eau d'irrigation 67
IV.6.2. Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures 70
IV.6.3. Débit maximum annuel de la rivière MUSASA 72
IV.6.4 : Débit de la rivière MUSASA pour une période de retour 73
IV.6.5. Bilan hydrique année humide avec rotation des cultures 74
IV.6.6. Bilan hydrique année moyenne avec rotation des cultures 75
IV.6.7. Bilan hydrique année sèche avec rotation des cultures 76
IV.7. Analyse des résultats 77
IV.8. Détermination de la hauteur des digues et dimensionnement hydrauliques 77
IV.8.1. Calcul de la hauteur des digues 77
IV.8.2. Vue en plan de la digue sur le marais MUSASA 78
IV.8.3. Coupe A-A et B-B de la digue sur le marais MUSASA 79

IV.8.4. Dimensionnement hydraulique de l'ouvrage d u dalot 80
IV.8.5. Vue en plan du dalot MUSASA, Coupe du dalot MUSASA et Coupe des murs en ailes du dalot MUSASA 82
IV.9. Conclusion Générale et Recommandation 84
IV.9.1. Conclusion Générale 84
IV.9. 2. Recommandation 85
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE 86
ANNEXES 88

SIGLES, NOTATIONS ET ABREVIATIONS

A	: Superficie
BCG	: Bureau Centrale Géomatique
BV	: Bassin Versant
CN	: Curve Number
CP	: Canal Primaire
DGM	: Direction Générale de la Météorologie
Dr-Ir	: Docteur- Ingénieur
ETR	: Evapotranspiration
FIDA	: Fonds International du Développement Agricole
FIT	: Front Intertropical de Convergences
FSI	: Faculté des Sciences de l'Ingénieur
HRmax	: Humidité Relative Maximales
HRmin	: Humidité Relative Minimale
HU	: Hdrogramme Unitaire
IDF	: Intensité, Durée, Fréquence
IGEBU	: Institut Géographique du Burundi
MNT	: Modèle du Terrain Naturel
P	: Périmètre
PNSADR-IM	: Programme National pour la Sécurité Alimentaire et de Développement Rural dans l'Imbo et le Moso
Prof	: Professeur
Q	: Débit
RN8	: Route Nationale numéro 8
SI	: Situation Initiale
V	: Vitesse
ZCIT	: Zone de Convergence Intertropicale

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Photos prises le 16/12/2022 à 15h00min illustrant les dégâts causés par la rivière MUSASA sur la Route Nationale Numéro 8 (RN8) 2
Figure I. 2 : Photos illustrant les dégâts de débordement des eaux de MUSASA sur les champs et l'infrastructure routière de la RN 11 3
Figure I. 3 : Schéma de la méthodologie du travail 5
Figure I. 4 : Inondation sur la Route Nationale Gatumba dans le secteur Kinyinya [2] 6

Figure II.1 : Cycle d'eau [9] 10
Figure II.2 : Temps de base d'un hydrogramme de crue 14
Figure II.3 : Schéma illustrant le bassin versant vue en plan 16
Figure II.4 : Vue d'un dalot 28

Figure III. 1 : Localisation de la zone d'étude 32
Figure III.2 : Carte des pentes de la zone d'étude 33
Figure III.3 : Carte topographique de la zone d'étude 34
Figure III.4 : Carte hypsométrique du bassin versant MUSASA 35
Figure III.5 : Variation de précipitions maximales journalières de MUSASA 37
Figure III.6 : Variation des hauteurs annuelles des précipitations MUSASA 37
Figure III.7 : Variation mensuelle de température 38
Figure III.8 : Humidité relative de l'air à la station MUSASA (Période 1997-2021) 39
Figure III.9 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière MUSASA 41
Figure III.10 : Distribution des précipitations selon la méthode de Huff (1967) 46
Figure III.11 : Courbe médiane de distribution des précipitations de MUSASA selon Huff . 49
Figure III.12 : Hyétogramme de projet 50
Figure III.13 : Hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA 57

Figure IV.1 : Inondation de marais MUSASA 58
Figure IV.2 : Localisation de la zone d'étude 59
Figure IV.3 : Carte de localisation du marais MUSASA 60
Figure IV.4 : Carte topographique du marais MUSASA 60
Figure IV.5 : Carte de surface du Marais MUSASA 61
Figure IV.6 : Menu principale du logiciel Aquacrop 66

Figure IV.7 : Menu principale du résultat de simulation 67
Figure IV.8 : Besoin net selon le calendrier du terrain [Riz-Riz] mi-Mars -fin début Juillet .. 68
Figure IV.9 : Besoin net selon le calendrier du terrain [Riz-Riz] Début Août -FinDécembre 69
Figure IV.10 : Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année humide avec rotation des cultures (riz-riz)..... 74
Figure IV.11 : Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année moyenne avec rotation des cultures (riz-riz)..... 75
Figure IV.12 : Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année sèche avec rotation des cultures (riz-riz) 76

LISTES DES TABLEAUX

Tableau II.1: Distribution d'une pluie de 24h selon la méthode SCS 26

Tableau III.1 : Hauteurs Maxima journalières et annuelles des précipitations de MUSASA entre les années (2001-2021) 36

Tableau III.2 : Variation mensuelle des températures à la station de MUSASA (1992-2021) 38

Tableau III.3 : Humidité relative de l'air à la station MUSASA (1997-2021) 39

Tableau III.4 : Répartition de la surface du Bassin versant MUSASA en fonction des altitudes 40

Tableau III.5 : Hauteurs maximales journalières et annuelles de MUSASA 43

Tableau III.6 : Classement de dix grand maxima journaliers pour la station MUSASA ... 43

Tableau III.7 : Paramètres d'ajustement des hauteurs suivant la loi des extrêmes de GUMBEL 44

Tableau III.8 : Hauteurs maximales annuelles générées par la loi des extrêmes de GUMBEL 45

Tableau III.9 : Détermination de l'intensité d'une averse de projet MUSASA selon la méthode de Huff 50

Tableau III.10 : Décomposition de la pluie par la méthode SCS-CN. 53

Tableau III.11 : Résultats de calcul de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA 54

Tableau IV.1 : Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures 70

Tableau IV.2 : Débits de la rivière MUSASA 72

Tableau IV.3 : Débit de la rivière MUSASA pour une période de retour 73

Tableau IV.4 : Bilan hydrique année humide avec rotation des cultures (riz-riz) 74

Tableau IV.5 : Bilan hydrique année moyenne avec rotation des cultures (riz-riz) 75

Tableau IV. 6 : Bilan hydrique année sèche avec rotation des cultures (riz-riz) 76

Tableau IV.7 : Définition de la période de retour des intensités horaires maximales de précipitation pour différents ouvrages hydrauliques 80

Tableau IV.8 : Valeurs usuelles des coefficients de ruissellement 80

Tableau IV. 9 : Récapitulatif des expressions utilisées pour le calcul des différents paramètres hydrauliques 81
Tableau IV. 10 : Calcul de la section hydraulique utile 81
Tableau IV. 11 : Caractéristiques de la section hydraulique trouvées 82

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, 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 reste un pays agricole par excellence, avec presque 90% de la population vivent du secteur agricole. Ce dernier, dont la croissance a connu une stagnation autour de 2%, qui se trouve confronté à divers problèmes notamment une forte pression démographique, des terres agricoles qui sont soumises à un processus intense d'érosion hydrique.

Le présent travail de fin d'études, intitulé « **Aménagement des marais en zone sensible à l'inondation : Cas du marais de MUSASA inondé par la rivière MUSASA en République du Burundi** », s'inscrit dans le cadre de la recherche des solutions pour résoudre les problèmes d'inondations des périmètres irrigués qui s'observent dans ce marais vers l'aval.

L'inondation est l'un des premiers risques aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural causant des dommages qui se traduisent par des coûts énormes qui affectent l'économie tant au niveau local que national.

Au cours de ce travail les inondations dans ce marais MUSASA et les besoins en eau d'irrigation ont été évalués. Il a été également question de protéger cette zone en se rassurant que les infrastructures ne sont pas inondées et que l'irrigation se fait adéquatement.

0 : INTRODUCTION GENERALE

Dans cette partie introductive, nous allons parler le contexte de notre étude, la problématique et justification de l'étude ainsi que la méthodologie de recherche.

0.1. Contexte, Problématique et Justification de l'Etude

0.1.1. Contexte de l'étude

L'eau c'est la vie dit-on, mais elle peut être également à l'origine des catastrophes. Nous suivons régulièrement ici et ailleurs, les bilans de dégâts aussi bien matériels qu'humains souvent difficile à chiffrer suite aux inondations des rivières et des fleuves causant des destructions des immeubles, routes, ponts, :: et des pertes en vies humaines.

En province de Rutana, dans le marais de MUSASA objet de ce travail, où passe la Route Nationale Numéro 8 (RN8), la rivière MUSASA cause des dégâts sur les champs qui s'y trouvent et une perturbation de transport et des personnes qui empruntent cette route pendant la saison pluvieuse.[1]

L'insuffisance des études hydrologiques dans les milieux ruraux ainsi que l'impact de ce fléau dans le domaine agro-pastoral et de l'environnement nous a incités à étudier l'ampleur de cette dernière et mettre en évidence le cas concret d'étude.

Ce marais à une superficie de 88,99ha non cultivée, notons que ce marais nécessite une attention particulière. Le problème heurté à son exploitation est qu'il est inondable pendant la saison pluvieuse et les eaux y stagnent même pendant la saison sèche. L'activité agricole est l'une des principales sources de revenus au Burundi, qui malheureusement ne parvient pas à satisfaire les besoins alimentaires des populations pour diverses raisons. L'une des raisons principales est la dégradation des conditions de productions souvent due aux inondations des marais.

Pour lutter contre ces inondations, nous proposons dans ce travail un système d'aménagement de ce marais sur la rivière MUSASA qui a pour but d'atténuer les débits des crues ayant pour effet de réguler son écoulement.

0.1.2. Problématique

Les eaux de la rivière MUSASA causent des dégâts dans les cultures de riz et perturbent la circulation des automobiles et des humains en particulier ; les ouvrages de franchissement (buses) construit au traversée de cette rivière sont bouchés et l'eau de celle-ci ne peut pas trouver le passage pour se déverser dans la rivière MUTSINDOZI et enfin se jeter dans la MALAGARAZI.

En saison sèche, le débit, l'énergie cinétique et la vitesse de la rivière MUSASA diminuent considérablement tandis qu'ils deviennent plus importants en période de pluie qu'ils se rendent responsable la destruction des plantes, des arbres, des routes et des ménages aussi bien au niveau de la zone de la retenue qu'au-delà et en aval de cette dernière. Voici ci-dessous des images qui montrent les dégâts causés par la rivière MUSASA.



Figure I. 1: Photos prises le 16/12/2022 à 15h00min illustrant les dégâts causés par la rivière MUSASA sur la Route Nationale Numéro 8 (RN8)

La dégradation de l'environnement suite à la pression démographique de la région ceci a pour conséquence la déforestation et la coupe des arbres plantés dans des bassins versants sur les sommets des collines dans les cas des projets de Banque Mondiale. Destruction des berges dépôts dans les bassins de rivière, la destruction des ponts et des buses. Ce phénomène a été observé dernièrement l'an 2020 au mois de novembre à février 2021 d'où on a observé les crues exceptionnelles du temps de retour à 1990-2020. Le problème heurté à son exploitation est qu'il est inondable pendant la saison pluvieuse et les eaux y stagnent même pendant la saison sèche. Voici quelques photos ci-dessous montrant les dégâts causés par la rivière MUSASA.



Figure I. 2 : Photos illustrant les dégâts de débordement des eaux de MUSASA sur les champs et l'infrastructure routière de la RN 11

0.1.3. Justification du sujet

Certaines causes des catastrophes citées ci-hautes trouvent leurs remèdes dans l'aménagement des marais. C'est dans cette logique que notre étude visée à marier ces problèmes d'aménagement des marais à l'inondation en assurant que l'infrastructure routière ne soit pas inondée et que l'irrigation se fait adéquatement afin d'augmenter la production agricole dans la plaine du MOSO.

En effet, une étude d'aménagement de cette zone sensible à l'inondation s'avère nécessaire en vue de trouver les remèdes aux causes qui ont été évoquées.

0.2. Objectifs

Dans notre étude de recherche, nous allons présenter un double objectif à savoir l'objectif global et les objectifs spécifiques.

0.2.1. Objectif global

L'objectif global du présent projet de fin d'étude consiste à étudier et proposer un projet d'aménagement des marais en zone sensible à l'inondation : Cas du marais de MUSASA inondé par la rivière MUSASA en République du Burundi.

0.2.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre les objectifs cités-ci hauts, il est indispensable de se fixer des objectifs spécifiques qui sont entre autres :

- ❖ Identification de tous les paramètres hydrologiques caractérisant le Bassin versant ;
- ❖ Etude du comportement hydrologique de la rivière MUSASA et son bassin versant ;
- ❖ Evaluation des dimensions des digues et dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

0.3. Méthodologie envisagée

La méthodologie de la recherche est la suivante :

- ❖ Délimitation du bassin versant (BV) et le marais MUSASA, ont délimités en utilisant :
- Le modèle numérique du terrain (MNT) ;
- Le logiciel ARCGIS, version 10.3 ;
- ❖ Détermination de l'hyétogramme et l'hydrogramme de ruissellement en utilisant la méthode de Huff ; la méthode d'indice w et la méthode de l'hydrogramme unitaire;

- Les calculs hydrologiques intégrant tous les principaux paramètres en rapport avec les bassins versants (superficie, forme, pentes et le régime pluviométrique, Hauteurs maxima, intensité d'averses, …).
- Le calcul des besoins en eau avec le logiciel Aquacrop ;
- Dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

En résumé, la méthodologie à suivre peut-être synthétisée à l'aide de l'organigramme de la figure suivante :

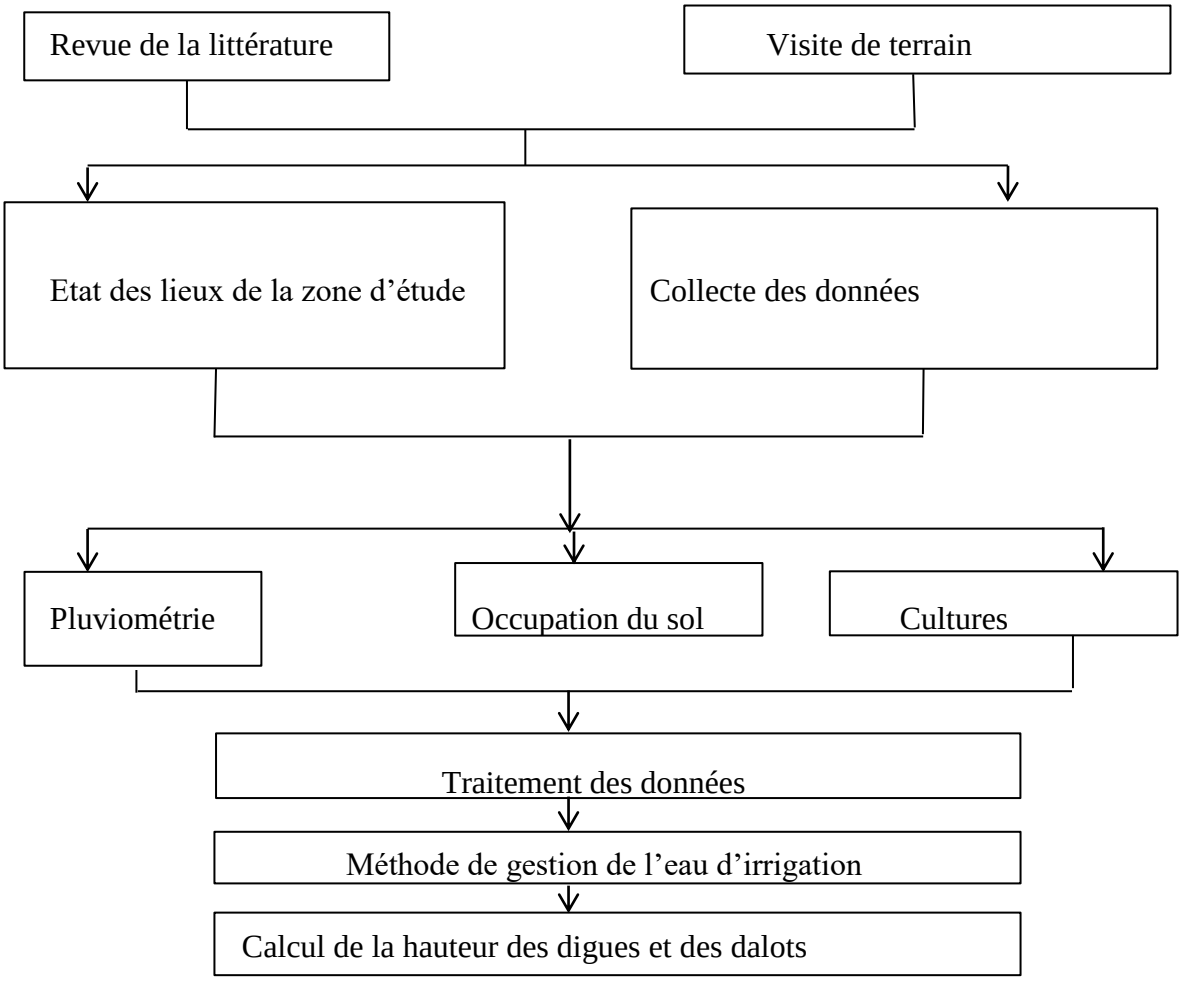


Figure I. 3 : Schéma de la méthodologie du travail

CHAPITRE.I : REVUE DE LA LITTERATURE

Dans ce chapitre, nous allons parler la revue de la littérature sur l'inondation.

I.1.Evolution d'inondation

La plupart des inondations se produisent lorsque le volume d'eau d'une rivière ou d'un cours d'eau dépasse la capacité du lit. Il y a également des inondations le long des lacs et des littoraux maritimes lorsque le niveau normal de l'eau augmente au-delà du niveau des terres riveraines.

De nombreux facteurs influent sur le débit d'une rivière, et donc sur les risques d'inondation. Parmi les plus importants, mentionnons la quantité et le type de précipitations, la nature et l'état du bassin versant, ainsi que le climat. [3]

I.1.1. Définition

Une inondation est définie comme une occupation massive par l'eau de zones auparavant sèches ou une inondation est la submersion par des eaux douces ou salées d'une zone généralement émergée. [4]



Figure I. 4 : Inondation sur la Route Nationale Gatumba dans le secteur Kinyinya [2]

Source : OCHA (Publié le 22/06/2021).

Bien qu'elles soient inévitables, ces inondations peuvent être contrôlées par l'activité humaine, par le biais d'une mauvaise utilisation des terres à proximité des cours d'eau. On estime que les inondations sont des catastrophes naturelles les plus meurtrières de la planète. Au cours du XXe siècle, on considère que 3,2 millions de personnes ont perdu la vie à la suite d'inondations, ce qui représente plus de la moitié des victimes de catastrophes naturelles au cours de la même période [5].

I.1.2. Types d'inondations

Il existe différents types d'inondations**,** qui peuvent être classés comme suit :

- Inondation pluviale : Ce type d'inondation se produit à la suite de fortes précipitations concentrées dans une zone particulière.
- Inondation fluviale : Ce type d'inondation se produit lorsque l'eau d'une rivière déborde et atteint les terres situées près du lit de la rivière ;
- Inondations côtières : elles se produisent à la suite de vents violents, par exemple un cyclone de tempête. Ces inondations pénètrent dans les zones côtières et couvrent de vastes étendues de terre.

I.1.3. Causes d'inondations

Les causes principales des inondations sont multiples, et peuvent généralement être classées comme naturelles ou comme conséquences de l'activité humaine :

a) Causes naturelles des inondations

- Fortes précipitations : elles peuvent être causées par des pluies, des tempêtes tropicales ou des ouragans. Ces inondations peuvent être causées par la montée du niveau des rivières. Plus la quantité d'eau tombée est importante et plus la période de précipitations est longue, plus la probabilité d'inondation est élevée.
- Accumulation de sédiments **:** ces accumulations forment de grandes barrières pour retenir l'eau qui, au fur et à mesure que la quantité (et la pression) d'eau augmente, finit par déborder.

b) Causes humaines des inondations

- Canaux d'eau dans les villes qui débordent par manque d'entretien en raison des précipitations ;
- Changement climatique, qui peut accélérer d'autres processus tels que la fonte des neiges. [6]

I.2. Conséquences des inondations

Les conséquences des inondations peuvent être :

- Économique : les inondations entraînent la perte de grandes quantités de biens matériels, à laquelle il faut ajouter le coût de la reconstruction des infrastructures.
- Environnemental : dommages aux terres agricoles, dommages aux cultures et à la production alimentaire. De plus, les inondations répandent également la pollution, nuisibles aux animaux et aux humains.
- Santé : les inondations augmentent le risque de maladies féco-orales et transmettent des agents pathogènes tels que le paludisme, la dengue, la leptospirose, la fièvre jaune ou choléra. Les personnes peuvent également être blessées par la chute d'arbres, des lignes électriques ou d'autres débris. [7]

I.3. Dégâts causés par les inondations

Les zones agricoles qui se retrouvent sous les eaux peuvent accuser des pertes importantes :

- ✓ Récoltes détruites ;
- ✓ Bétail noyé, etc.

CHAPITRE.II : NOTION HYDROLOGIQUE

L'hydrologie est la science qui étudie l'occurrence, la distribution et les mouvements (déplacement et changement d'état) des précipitations sur la terre, dans la terre et au-dessus de la terre, elle contient deux principales disciplines : L'hydrologie de surface et l'hydrologie souterraine.

La distribution et le mouvement des précipitations sur la terre sont conditionnées par les différentes activités humaines en zones urbaines.

L'hydrologie urbaine s'est constituée en domaine spécifique pour adapter les techniques utilisées en hydrologie aux particularités des espaces urbains :

- Faible dimension des bassins versants ;
- Forte imperméabilisation des sols en zone urbaine ;
- Grande vulnérabilité des espaces urbains face aux inondations et importance des enjeux financiers, environnementaux et sociaux.

II.1. Précipitations

Dans toutes les rivières, le débit de l'eau fluctue. Lors d'une pluie torrentielle, plusieurs paramètres déterminent le ruissellement qui atteint une rivière : la quantité, l'intensité, la durée, l'aire couverte et le trajet de la pluie.

Le volume, l'intensité et la durée des précipitations influent sur la capacité de la terre d'absorber la pluie, ce qui à son tour influe directement sur le ruissellement.

La superficie couverte et le débit du ruissellement déterminent le volume d'eau qui passera en un point donné en aval de la rivière ou du cours d'eau.

En météorologie, le terme précipitation désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol ou s'évaporent en virga avant de l'atteindre.[8]

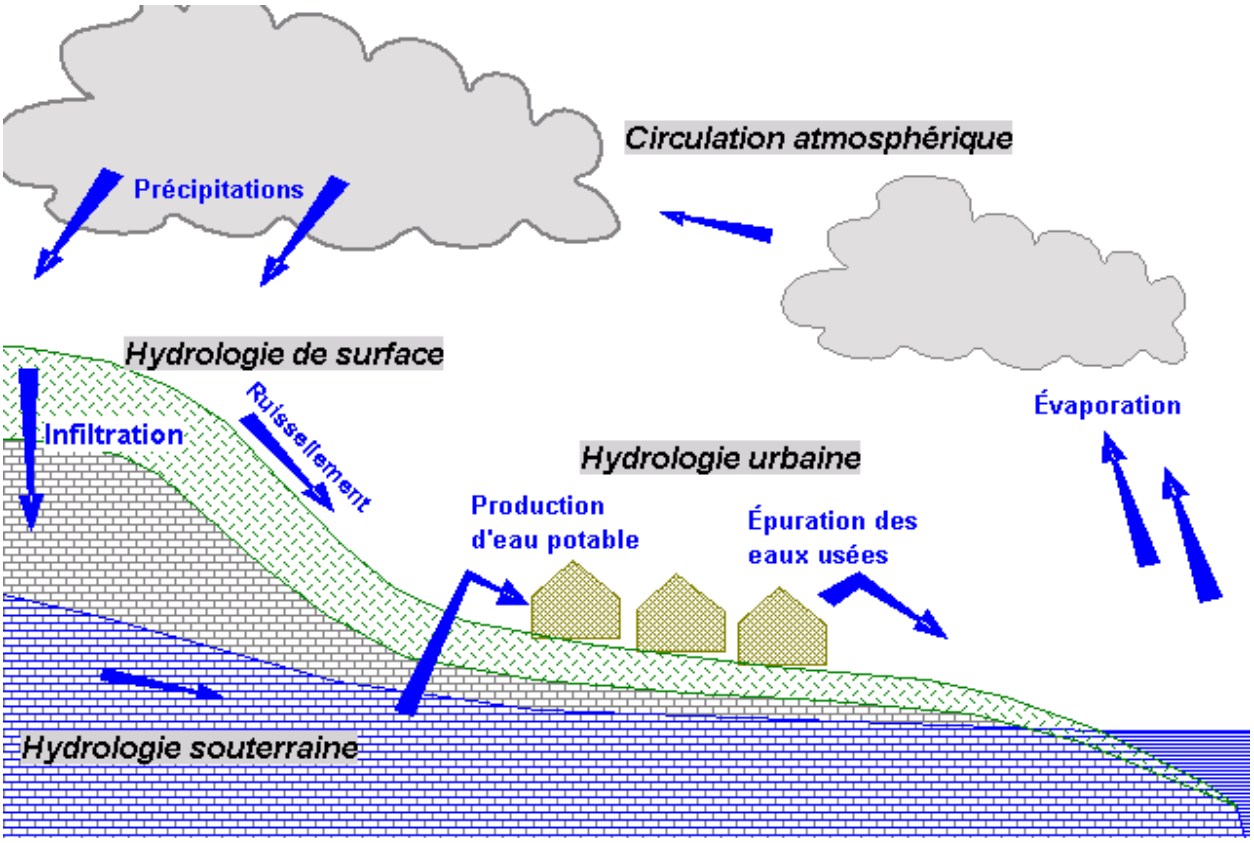


Figure II.1 : Cycle d'eau [9]

Les précipitations constituent un phénomène qui décrit le transfert d'eau dans sa phase liquide ou solide entre l'atmosphère et le sol. Au-dessus des continents, les précipitations représentent l'élément le plus important du cycle hydrologique, leur volume étant supérieur des autres composantes.

Les données pluviométriques intéressant l'ingénieur sont principalement, pour un lieu ou une région donnée :

- La hauteur totale annuelle d'eau tombée, moyenne ou maximale ;
- Les hauteurs mensuelles d'eau tombée, moyenne et maximale ;
- La plus forte pluie tombe est sa durée.

Les principales caractéristiques des précipitations sont :

- Les intensités ;
- Les fréquences.
- La durée.

Les courbes IDF reprennent les trois premières caractéristiques et sont mathématiquement données par la formule générale ci-dessous :

$$i(t) = \frac{aT^b}{c+t^d} \quad \text{(II.1)}$$

Où :

T (années) : Période de retour de l'averse ;

t : temps de la pluie (durée de l'averse)

i (mm/h) : Intensité des précipitations

a, b, c et d : constantes régionales.

II.2. Evapotranspiration

Les deux termes évaporation et évapotranspiration désignent tous les deux des pertes en eau par retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration interviennent dans le cycle hydrologique dès le moment où les précipitations atteignent la surface du sol ou de la végétation. L'évaporation est, après les précipitations, le terme le plus important du bilan hydrologique (à long terme).

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus séparés de perte d'eau par évaporation à la surface du sol d'une part, et par transpiration des plantes d'autre part.

C'est ainsi qu'on installe souvent dans les zones d'étude des stations évapométres équipes d'appareils permettant la mesure directe de l'évaporation sur une longue période. Ces instruments sont soit de petites surfaces d'eau calme (bac d'évaporation), soit des surfaces humides de papier (évapomètre de PICHE) ou de porcelaine poreuse (altomètre de BELLAN).

Le déficit hydrique, qui peut également s'exprimer sous le terme de besoins en eau (B), se définit comme la différence entre l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture considérée et les précipitations efficaces (Peff).

L'évapotranspiration réelle s'obtient en multipliant l'évapotranspiration de référence par le coéfficient cultural.

$$ET_R = ET_O * K_C \quad \text{(II.2)}$$

Avec :

- ET_o : représente l'évapotranspiration standard définie par Penman (1956) comme étant la quantité d'eau transpirée par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant 14 complètements le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau. Elle se calcule à partir de la formule de Penman-Monteith et des données climatiques de la région.
- K_c : correspond au coéfficient cultural, fonction du type de culture et de son état végétatif.

Les données climatiques (moyennes mensuelles) à fournir pour déterminer l'Evapotranspiration sont reprises ci-dessous :

- T_m : températures moyenne, exprimées en °C ;

- HR_m : humidités de l'air moyenne, exprimées en % ;

- V_m : vitesse du vent moyenne, exprimées en m/s ;

- Pa : pression de l'air, exprimée en kPa ;

- P : précipitations exprimées en mm ;

- N : nombre de jours de précipitation par mois ;

- Insol. : Durée d'insolation, exprimée en heure ;

- ETo : évapotranspiration de référence calculée par la méthode de Penman-Monteith, exprimée en mm/jour.

Il faut noter que plusieurs formules sont disponibles pour le calcul de l'ET_O selon les caractéristiques climatologiques disponibles sur terrain.

La formule d'Ivanov utilisé dans la méthode classique :

$$ET_O = 0{,}0018 * (25 + T^2) * (100 - \frac{e}{100e_0}) \qquad \text{(II.3)}$$

T : température moyenne mensuelle de l'air ;

e_0 et e : tension de vapeur saturante et tension de vapeur de l'air à la température ambiante (mb).

La formule de Penman :

$$ET_O = \frac{0{,}408.\Delta.(Rn - G).d + \gamma \frac{37}{t+273} v(ew - e)}{\Delta + \gamma(1 + \frac{rs}{208} v)} \quad \text{(II.4)}$$

Avec :

- ET_o : évaporation de référence (mm/h) ;
- R_n : rayonnement net ($W.m^2$) ;
- G : flux de chaleur du sol ($W.m^2$) ;
- d : longueur du pas de temps en k secondes ($d=3.6\ 10^{-3}$ ks) ;
- t : température moyenne horaire de l'air (°c) ;

  Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($kPa.°C^{-1}$) ;

  γ : constante psychrométrique ($kPa.°C^{-1}$) ;
- e : tension de vapeur à la température t ((kPa) ;
- e_w : tension de vapeur saturante ((kPa) ;
- v : vitesse moyenne du vent à 2m ($m.s^{-1}$).

La pluie efficace, Peff, représente la fraction des précipitations qui est effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation profonde. Différentes méthodes ont ainsi été développées, chacune prenant en compte le climat de la région où doivent s'effectuer les mesures.

-La première formule propose un pourcentage fixe :

$$Peff = A * Pmoy \quad \text{(II.5)}$$

Dans laquelle A est une fraction donnée par l'utilisateur. En général, A est compris entre 0,7 et 0,9.

- La deuxième formule a été développée à partir de données provenant de zones arides et semi-arides :

✓ Pour Pmoy < 70 mm/mois :

$$Peff = 0{,}6 * Pmoy - 10 \quad \text{(II.6)}$$

✓ Pour Pmoy > 70 mm/mois :

$$Peff = 0{,}8 * Pmoy - 25 \quad \text{(II.7)}$$

- La troisième formule a été mise au point par le département américain de l'agriculture (USDA):

✓ Pour Pmoy < 250 mm/mois :

$$Peff = Pmoy * (1 - 0{,}2 * Pmoy / 125) \quad \text{(II.8)}$$

✓ Pour Pmoy > 250 mm/mois :

$$Peff = 125 + 0{,}1 * Pmoy \quad \text{(II.9)}$$

La pluie utile à la culture est la portion d'eau tombée contribuant à la satisfaction des besoins en eau de la culture. Elle peut être définie par la relation :

$$Pu = Pt - R - D \quad \text{(II.10)}$$

Où :

- Pu : précipitation utile ;
- Pt : pluie totale ;
- R : quantité d'eau ruisselée ;
- D : quantité d'eau drainée au-dessous de la zone de sol exploitée par les racines.

Généralement, la pluie utile est calculée comme étant 80% de la pluie totale (0,80) ou bien moyennant la formule suivante :

$$P_u = (1025 \times Pt 0{,}824 - 2{,}93) \times 100{,}000955 XETC \quad \text{(II.11)}$$

II.3. Hydrogramme d'un cour d'eau

L'hydrogramme d'un cours d'eau est une courbe des débits en fonction du temps Q (t) dans une section d'une cour d'eau. Cette courbe présente de nombreuses fluctuations d'amplitude, de période et de forme. Si la rivière ne comporte aucun ouvrage dérivation ou de régulation artificielle, chacune de ces fluctuations est le reflet d'une variation des facteurs hydrométéorologiques agissant sur le bassin versant. [*Rocha*. (2014)]

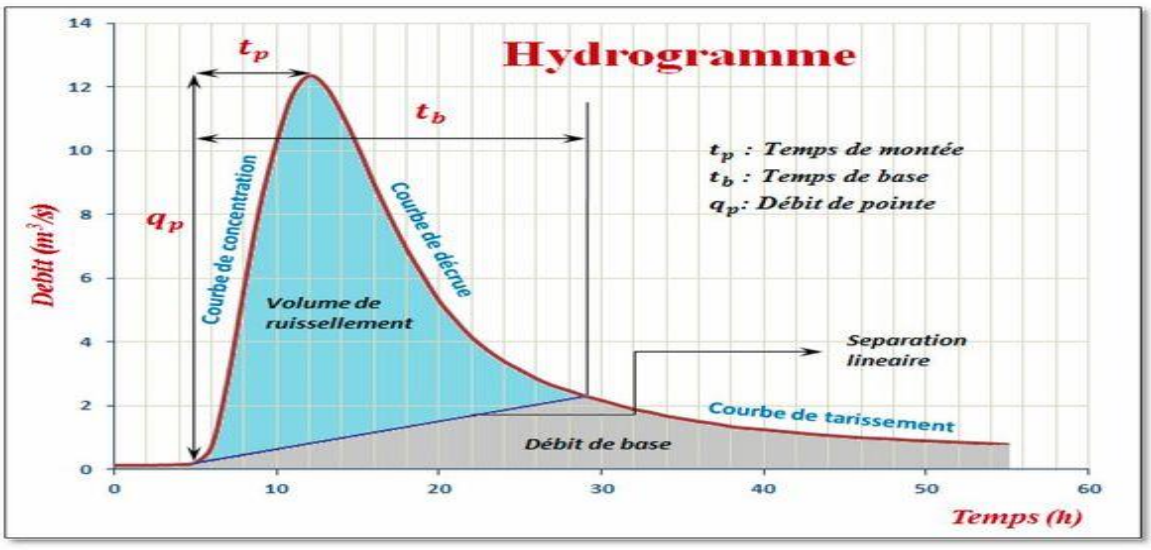


Figure II.2 : Temps de base d'un hydrogramme de crue

Le temps de base est avec le temps de montée et le débit de pointe, l'un des facteurs principaux déterminant la forme de l'hydrogramme unitaire synthétique.

II.4. Notions de calcul du temps de concentration

Il est existé plusieurs formules empiriques permettant de connaitre le temps de concentration, on peut citer :

- La formule de Giandotti :

$$tc = \frac{4A^{0,5}+1,5L}{0,8I^{0,5}} \quad \text{(II.12)}$$

- La formule de Turazza :

$$tc = 0,127\sqrt{\frac{A}{I}} \quad \text{(II.13)}$$

- La formule Passini : $$t_c = 0.14\,\frac{(AL)^{\frac{1}{3}}}{(I)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{(II.14)}$$

Où :

A : Superficie du bassin versant en Km^2 ;

I : Pente moyenne du bassin versant ;

L : Longueur du thalweg en Km ;

t_C : Temps de concentration en minute (min).

Certains auteurs ont proposé des modèles plus appliqués qui tiennent compte des principaux paramètres de ruissellement qui sont :

- L'intensité de la pluie ;
- L'occupation du sol ;
- La nature du sol ;
- La pente ;
- La forme du bassin.

II.5. Hauteur des précipitations

La hauteur totale des précipitations reçues par un bassin versant donne une idée globale de l'état naturel d'humidité du sol et d'intensité des averses. Il s'agit effectivement d'une idée globale car il faut en outre tenir compte de l'alternance des saisons et du nombre total de jours de pluie sur une période considérée. La hauteur moyenne des précipitations sur un bassin versant comportant plusieurs stations pluviométriques est donnée par :

$$P = \sum WiPi \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

$$Wi = \frac{A_i}{A_{Bv}}$$

Où Pi : Hauteur de précipitation à la station i ;

Wi : Coefficient de pondération pour la station ;

A_i : Surface attribuée à la station qui peut être déterminée par la construction du polygone de Thiessen ;

A_{Bv}: Surface du bassin versant.

P : Hauteur de précipitation moyenne sur le bassin.

Pour obtenir la hauteur moyenne des précipitations sur un bassin versant comportant une seule station pluviométrique, on ajuste la hauteur des précipitations en fonction de la superficie [Pierre F. Lemieux, Université de Sherbrooke, 2006].

II.6. Quelques caractéristiques d'un bassin versant

Le bassin versant est ainsi le territoire sur lequel tous les écoulements des eaux convergent vers un même point, l'exutoire de ce bassin. [10]

Les limites séparant deux bassins versants sont appelées lignes de partage des eaux et sont constituées des sommets qui séparent les directions d'écoulement des eaux de ruissellement.

Ainsi, chaque goutte qui tombe ou arrive sur le bassin versant d'un cours d'eau, aura pour destination finale l'exutoire de ce cours d'eau. [11]

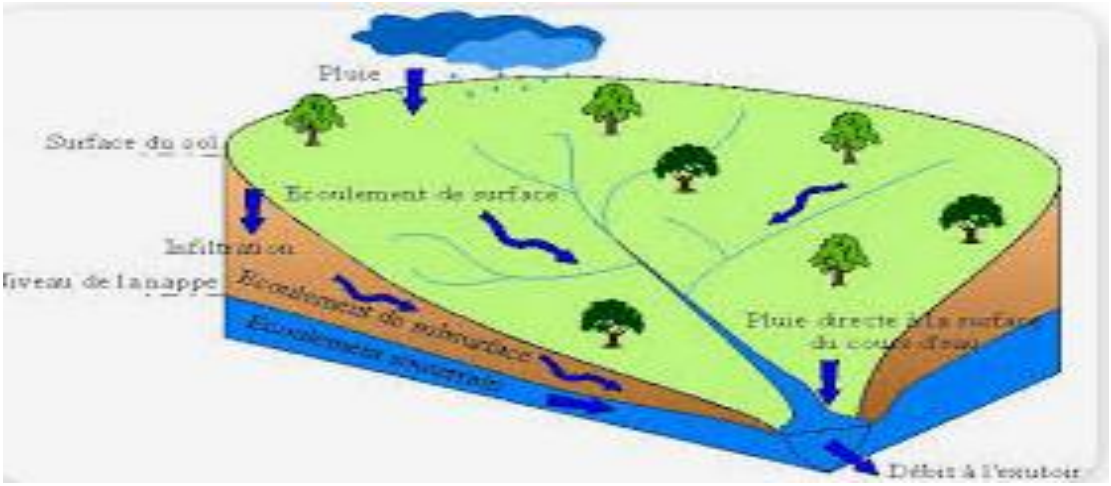


Figure II.3 : Schéma illustrant le bassin versant vue en plan

Les différentes caractéristiques du bassin versant:

a. La superficie

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.

Un plus grand bassin augmente les superficies contributives et par conséquent, débit de pointe, il augmentera aussi le temps de cheminement avec toutes ses conséquences.

b. La forme

La forme du bassin versant influe beaucoup sur le débit de pointe et le temps de concentration à l'exutoire. Pour déterminer la forme du bassin versant, on a utilisé les indices suivants :

- **Coéfficient de compacité K_G**

Ce coefficients trouve par Gravelius, est le rapport entre le périmètre du bassin versant et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin :

$$K_G = \frac{P}{2\pi R} \quad \text{(II.16)}$$

Avec :

$$A = \pi R2\ ;$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Ce qui implique que :

$$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

$$K_G = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{(II.17)}$$

Où :

K_G : Coefficient de compacité ;

A : Superficie du bassin versant ;

P : Périmètre du bassin versant.

$1.5 < K_G < 1.8$ Bassin de forme allongée

$1.0 < K_G < 1.15$ Bassin de forme ramassée

Avec :

- P : Périmètre du bassin versant Km

- A : Surface du bassin versant en km^2
- Kc=1 correspondrait à un bassin versant idéalement circulaire. Ainsi, les valeurs de Kc partent de 1 et augmentent au fur et à mesure que les bassins versant deviennent plus allongés.

Les bassins versants à grand coefficient de compacité sont plus allongés et connaissent donc des hydrogrammes plus ou moins aplatis, avec des débits de pointe modérés et un temps de concentration relativement élevé (NIBIGIRA L., 2018).

La forme est aussi déterminée par l'indice de forme de Horton.

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur de la cour d'eau principal (Horton, 1932).

$$K_H = \frac{A}{L^2} \quad \text{(II.18)}$$

Avec :

K_H : Indice de Horton sans dimension.

$K_H < 1$: Bassin de forme allongée.

$K_H > 1$: Bassin de forme ramassée.

A : Surface du bassin versant (Km^2).

L : Longueur du cours d'eau principal (Km).

Le bassin versant est assimilé à un rectangle équivalent de même périmètre et de même superficie.

Soit la largeur (l) et la longueur (L) de rectangle équivalent,

Comme :

$$K_C = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{(II.19)}$$

On a :

$$P = \frac{K_C\sqrt{S}}{0{,}28} = 2(L+1) \quad \text{(II.20)}$$

Avec : $$S = L * l \quad \text{(II.21)}$$

D'où :

$$L = \frac{K_C\sqrt{A}}{1{,}12}[1 + \sqrt{1 - (\frac{1{,}12}{Kc}}\text{)^2}] \quad \text{(II.22)}$$

$$l = \frac{P}{2} - L \quad \text{(II.23)}$$

II.7. Forme du réseau hydrographique

Un réseau hydrographique est un organisme d'écoulement d'importance très variable, formé par un ensemble d'éléments linéaires hiérarchisés. L'espace drainé est un bassin hydrographique (bassin versant) délimité par des lignes de partage des eaux qui le séparent des réseaux adjacents. [12]

La forme du réseau hydrographique dépend d'un complexe de facteurs qui agissent en interaction. Les plus importants sont:

- La géologie agit par la nature lithologique des terrains traversés par l'eau ainsi que par les structures (failles, plis) qui orientent le courant et déterminent les pentes régionales, (agit sur la forme)
- Le climat par le biais du régime des précipitations, détermine la densité du réseau hydrographique, dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- Rapport de longueur **:** C'est le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n aux longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n – 1

$$R_{l(n)} = \frac{Longueur\ moyennne\ des\ cours\ d'eaud'ordre\ n}{Longueur\ moyennne\ des\ cours\ d'eaud'ordre\ n-1} = \frac{L}{L_{n-1}} = cte \qquad \text{(II.24)}$$

II.8.Transport solide

Le transport solide est un phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composé d'éléments granulaires (sédiments fins, sables,…) sous l'action de l'écoulement de l'eau. Ce transport a lieu sur le versant (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 longue distance dans la masse de l'écoulement)
- saltation (mode intermédiaire saut sur de courtes distances)
- Charriage (Déplacement des particules au contact du fonds)

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 :

$$E = \frac{1}{36}\left(\frac{Px^2}{Pa}\right)^{2,65} * \left(\frac{H^2}{S}\right)^{0,46} \qquad \text{(II.25)}$$

Avec :

E: Apport solide annuel moyen spécifique t/km2/an

Px : Pluviométrie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm)

Pa: Pluviométrie moyenne annuelle (mm)

S: Superficie du bassin versant (km2)

H : dénivelée moyenne (mm)

- La formule de GRAVILOVIC

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

$$D = TxPx\pi x\sqrt{Z3} \quad \text{(II.26)}$$

Où

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

P : Pluie moyenne annuelle en mm ;

$$T = \sqrt{\frac{to}{10}} + 1 \quad \text{(II.27)}$$

Avec :

to : la température moyenne annuelle en °C ;

Z : coefficient d'érosion.

Altitude moyenne :

$$H_M = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\left[S_i \frac{h_{i+h_{i+1}}}{2}\right] \quad \text{(II.28)}$$

Avec :

- Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant en (m).
- A : Surface totale du bassin versant en (Km^2).
- Si : La surface comprise entre deux courbes de niveau en (Km^2).
- hi, hi+1 : Altitudes haut et bas qui délimite la surface Si en (m).

Le coefficient de forme K_F

$$Kf = \frac{bm}{la} ; \quad \text{(II.29)}$$

Avec :

- bm : largeur moyenne suivant le cour d'eau principal
- la : longueur axial du cours d'eau.

On peut supposer que l'écoulement sur un bassin donné est approximativement le même que sur un rectangle de même superficie ayant le même coefficient de GRAVELIUS et de même répartition hypsométrique.

II.9. Indice de pente

En partant dans la notion du rectangle équivalent, DURET définit un indice de pente qui tient compte de la totalité du relief.

$$IP = \frac{l}{L}\sum S_i(d_i - d_{i-1}) \quad \text{(II.30)}$$

Où

- d_i et d_{i-1} : Les côtes de deux courbes de niveau voisines ;
- S_i : Portion de surface total comprise entre ces deux courbes ;
- L : Longueur de rectangle équivalent.

II.10. Caractéristique d'un cour d'eau

- Profil en long : courbe sur laquelle on porte en abscisse la distance depuis la source et en ordonné la hauteur du plan d'eau.
- Pente longitudinale : différence entre le niveau du point le plus éloigné et l'embouchure par sa longueur totale.

$$I_L = \frac{H}{L} \quad \text{(II.31)}$$

Où

I : pente

H : dénivelée totale

L : longueur totale.

II.11. Equilibre hydrologique

Pour chaque bassin versant, dans un intervalle de temps bien déterminé, la somme de toute sorte d'eau qui y entre est égale à la somme des toutes sortes d'eau qui y sortent plus une certaine quantité d'eau qui reste dans le sol, on l'appelle déficit d'écoulement.

On écrit :

$$I = 0 + \Delta W \quad \text{(II.32)}$$

Avec :

I : Int (somme des entrées) ;

O : Out (somme des sorties) ;

Δw : Variation du stock.

II.12. Caractéristiques agro-pédo-géologiques

II.12.1. 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.

II.12.2. 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.

II.13. Modélisation hydrologique

L'hydrologie joue un rôle capital dans le domaine de l'ingénieur et des sciences environnementales. 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.

a) Fonction de production

La fonction de production (FP) permet de déterminer la portion de la pluie brute appelée pluie nette ou efficace qui va participer à l'écoulement et contribuer au débit à l'exutoire. Elle cherche à représenter l'interaction entre le sol et la lame d'eau précipitée pour connaitre quelle part de la pluie va être stockée dans le sol, quelle sera celle qui va ruisseler et dans quelles conditions (Abdeddaim H. ,2018)

Le rapport de la pluie nette ou lame ruisselante (Hru) et de la pluie totale(H) est le coefficient de ruissellement

$$(Cr).cr = \frac{Hru}{H} \qquad \text{(II.33)}$$

L'équation générale de la pluie efficace en fonction de la pluie brute se présente sous la forme générale suivante :

$$PE = \frac{(P-P_1)^m}{P^{m-1}+P_0(m-1)}\ pour\ P > P1 \qquad \text{(II.34)}$$

$PE = 0\ Pour\ P < P1$

Po et P1 ce sont des paramètres homogènes à des hauteurs de pluies.

Ces paramètres dépendent de l'histoire hydrométéorologique, et tout particulièment de l'humidité du sol superficiel. Pour le modèle SCS, m'est égal 2 (Thierriot,C.,& Gouze,J-C., 1989). Il en est de même pour le modèle de G. Girard (1975) et celui de Duband (1982) utilisé en France.

Au cours du présent travail, nous avons optée pour le modèle SCS et ce dernier se présente sous la forme générale suivante :

$$P_E = \frac{(\boldsymbol{P-la})^2}{\boldsymbol{P-l_a+s}} \qquad \text{(II.35)}$$

Avec :

P_E : précipitation efficaces (mm) ;

P : Précipitation totale ou pluie brute (mm) ;

I_a : Pertes initiales par interception avant submersion (mm) ;

S : Stockage potentiel (mm).

Le stockage potentiel et les pertes initiales sont linéairement reliés :

$$Ia = C_a s \qquad \text{(II.36)}$$

D'où :

$$P_E = \frac{(P-C_aS)^2}{P+(1-C_a)S} \qquad \text{(II.37)}$$

Pour le modèle SCS, Ca est prise égale à 0,2. Le stockage potentiel (S) considéré ici est celui des conditions d'humidité normale définie par :

$$S = 25{,}4(\frac{1000}{CN} - 10) \qquad \text{(II.38)}$$

Avec :

CN : Curver number ou le numéro de courbe

Le numéro de courbe ou 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 (Te Chow, et all. 149), on a :

Conditions normales : $$(II) = \frac{25400}{S+254} \quad \text{(II.39)}$$

Conditions sèches : $$(I) = \frac{4{,}2CN(II)}{10-0.058CN(II)} \quad \text{(II.40)}$$

Conditions humides : $$(III) = \frac{23CN(II)}{10+0{,}13CN(II)} \quad \text{(II.41)}$$

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

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).

b) Fonction de Transfer

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.

II.14. Détermination du quartile d'une période de retour T

Chaque valeur de la variable x de la série de n variables aléatoires X (x1, x2, …, Xn) peut être exprimée en fonction de la moyenne et de l'écart par rapport à la moyenne par :

$$x = \bar{x} + \Delta x \quad \text{(II.42)}$$

Avec :

$\bar{x}$: est la moyenne ;

Δx : est l'écart par rapport à la moyenne.

L'écart par rapport à la moyenne est une fonction des caractéristiques de dispersion de la distribution :

$$\Delta x = k.s \quad \text{(II.43)}$$

D'Où :

k : est un facteur de fréquence

s : est l'écart type de la série des variables aléatoires.

$$x = \bar{x} + k.s \quad \text{(II.44)}$$

Pour un quartile de période de retour T, la valeur correspondante (XT) est déterminée par l'expression générale suivante :

$$x_T = \bar{x} + kT.s \quad \text{(II.45)}$$

Chaque loi de probabilité est caractérisée par son facteur de fréquence.

II.15. Loi de Gumbel

La loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle est une loi de probabilité à deux paramètres dont la fonction de répartition ou fréquence de non dépassement s'écrit :

$$u = -\ln(-\ln(F(x)) \quad \text{(II.46)}$$

Un quartile de x_T de periode de retour T, on aura :

$$u_T = -\ln(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)) \quad \text{(II.47)}$$

Dans notre travail, la hauteur maximale des précipitations est répartie suivant la méthode du NRCS (SCS) [distribution du type IA] dont les développements des principes se situent dans le livre de Musy,1998. Le tableau suivant donne la distribution d'une pluie de 24h selon la méthode SCS. L'objectif de cette distribution est de trouver la hauteur maximale des précipitations.

Tableau II. 1 : Distribution d'une pluie de 24h selon la méthode SCS

Précipitations de 24h					
Heures	t/24	Type I	Type IA	Type II	Type III
0	0	0	0	0	0
2.00	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020
4.0	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043
6.0	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072
7.0	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089
8.0	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115
8.5	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130
9.0	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148
9.5	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178
10.0	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189
10.5	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216
11.0	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250
11.5	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.489	0.669	0.655	0.375	0.339
12.0	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500
12.5	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702
13.0	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751
13.5	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785
14.0	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811
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)

II.16. Détermination de l'hydrogramme des crues

Pour le présent projet, les hydrogrammes de crues au niveau des différents exutoires et pour une période de retour de 100 ans sont déterminés à base de l'hydrogramme unitaire du SCS.

Ce dernier correspond à l'hydrogramme de ruissellement généré par une averse de durée « tu » et de hauteur efficace égale à l'unité (1mm ou 1''=25,4mm) tombant uniformément sur le bassin versant.

Le débit de point de l'averse unitaire est évalué par l'équation suivante :

$$Q_P = \frac{0.75}{360} * \frac{A*hru}{t_p} \qquad \text{(II.48)}$$

Avec :

Q_P : débit de pointe en m^3/s ;

A : aire du bassin versant en ha ;

H_{ru} : lame d'eau éfficace de l'averse ;

t_p : temps de monte en heure.

Dans ce cas le temps de monté t_p est déterminé par la relation ci-dessous :

$$tp = \frac{t_u}{2} + 0.6 * t_c \qquad \text{(II.49)}$$

Avec :

t_u : durée de l'averse unitaire ;

t_c : temps de concentration.

La durée de l'averse unitaire est une fraction du temps de concentration dans le bassin versant. Elle est calculée par la relation suivante :

$$t_{u=\frac{2}{15}*t_c} \qquad \text{(II.50)}$$

Beaucoup de méthode de décomposition de l'averse en ses composantes sont disponibles. Nous pouvons citer à titre d'exemple la méthode de l'indice ϕ ; la méthode de l'indice W (proportionnelle); la méthode de l'indice W minimum et la méthode SCS-CN.

Parmi ces différentes méthodes de décomposition de l'averse en ses composantes, nous avons utilisé la méthode de l'indice W à cause de sa simplicité.

Dans notre travail, le pas de temps fixé dans la décomposition de l'averse brute a été choisi de manière à faciliter la détermination de la lame éfficace accumulée pendant une durée égale à celle de l'averse unitaire. Pour cette raison, il a été pris égal à la durée de l'averse unitaire.

II.17. Dalots

II.17.1. Description

Les dalots sont des ouvrages à section rectangulaire permettant d'assurer le passage de l'eau sous la chaussée. Ils sont constitués par des murs verticaux appelés les piédroits reposant sur un radier général ou une semelle, sur lesquels repose une dalle en béton armé continu ou constituée par la juxtaposition d'éléments préfabriqués. [BEMBAMBA.pdf.2013 p25]

On distingue différents types de dalots :

- Les dalots ordinaires ;
- Les dalots cadres ;
- Les dalots portiques.

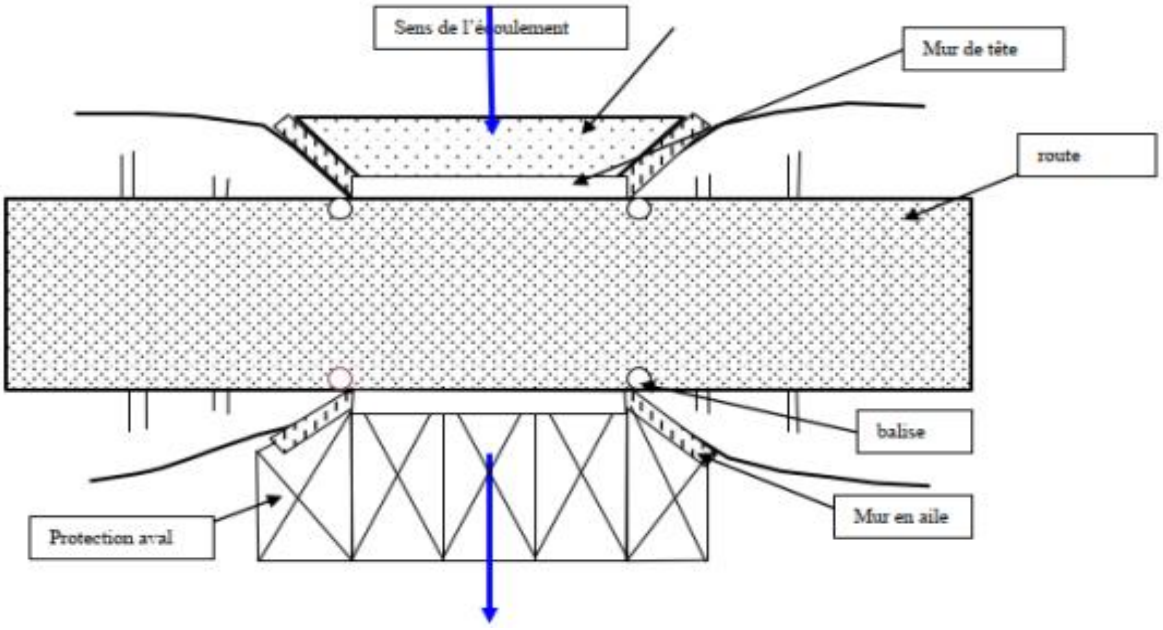


Figure II.4 : Vue d'un dalot

Source : *hydraulique routier, 2013 (BEMBAMBA.pdf)*

On adopte les dalots pour des débits élevés, supérieurs à 10 m^3 /s.

II.17.2. Principe du dimensionnement

Pour le dimensionnement hydraulique des dalots et des ponts cadres, on considère le plus généralement la sortie dénoyée avec l'écoulement à surface libre qui est le plus fréquent. La condition pour un écoulement dénoyé est : la hauteur amont (H1) doit être inférieure ou égale à 1,25 fois la hauteur (D) de l'ouvrage (la condition H1/D<1,25).

La sortie noyée est obtenue lorsque que le niveau de l'eau à l'exutoire immédiat de l'ouvrage dépasse le bord supérieur de l'ouvrage. C'est le cas des ouvrages situés en zone inondable ou subissant la marée en zone littorale, ou présentant un niveau aval élevé parce qu'ils sont à la confluence avec un autre cours d'eau à fortes crues.

Pour le dimensionnement des dalots les étapes sont les suivantes :

- Etape 1 : Calcul du débit à évacuer

A ce niveau il s'agit d'effectuer les calculs hydrologiques qui fourniront le débit du projet. L'on a utilisé les méthodes ORSTOM et CIEH. Ces deux méthodes de détermination des débits sont explicitées plus haut, et a permis d'avoir le débit projet Q100.

- Etape 2 : Calcul de la profondeur en amont H1

A cette étape il s'agira, de calculer la profondeur amont et de vérifier si celle-ci est conforme à la situation topographique de l'ouvrage, après avoir estimé une valeur approchée de D et B (hauteur et largeur dans le cas des dalots), en utilisant pour cela la formule de base Q= V x S, dans laquelle l'on déduit S la section mouillée (avec Q connu et V la vitesse, Vlimite étant fixée à 3m/s), et D étant également fixé pour les dalots on déduira B.

Pour calculer le débit réduit Q*. On utilisera ensuite la formule :

$$Q* = \frac{Q}{BD*(2gD)^{\frac{1}{2}}} \qquad \text{(II.51)}$$

Avec :

Q* : debit reduit ;

B : largeur d'un dalot ;

D : hauteur d'un dalot.

Cette valeur donnera la valeur réduite H* 1 en utilisant l'abaque (du document « Hydraulique routière » de Nguyen VAN TUU [1978], [page 247], joint en annexe.

La valeur de H1 est ainsi calculée par la relation :

$$H * 1 = H1/D. \quad \text{(II.52)}$$

La valeur H1 ainsi trouvée est comparée avec la situation topographique du projet

- Etape 3 : Calcul de la pente critique Ic

L'ouvrage doit être capable d'évacuer le débit critique correspondant à la profondeur H1 amont. Pour cela, il faut que la pente longitudinale de l'ouvrage soit au moins égale à la pente critique (I supérieure ou égale à Ic). Il s'agira donc à cette étape de calculer la pente critique de l'ouvrage (notée Ic) qui guidera sur le choix de la pente longitudinale de l'ouvrage (notée I). Connaissant B et q, on calcule le débit réduit pour la pente critique en utilisant la formule suivante:

$$Q * i = \frac{q}{(gB^5)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{(II.53)}$$

On lira sur l'abaque (du document «Hydraulique routière » de Nguyen VAN TUU [1978], [page 257] joint en annexe 2 figure 18) la valeur de la pente I*c qui permet d'avoir la pente critique Ic par la formule suivante :

$$Ic = g * \frac{g * I_C}{K * B^{\frac{1}{3}}} \quad \text{(II.54)}$$

Connaissant le coefficient de rugosité K. la pente longitudinale à donner à notre ouvrage sera supérieure ou égale à la pente critique ainsi déterminé.

- Etape 4 : Calcul de la vitesse dans l'ouvrage

Au niveau de cette étape il s'agira de calculer la vitesse de l'eau dans l'ouvrage, et de vérifier si celle-ci ne dépasse pas la vitesse limite (prise égale à 3 m/s).

L'on calculera le débit réduit Q * v à partir des formules dérivées de Manning et en fonction de la pente longitudinale retenue :

$$Q * v = \frac{q}{K * I^{\frac{1}{2}} * B^{\frac{8}{3}}} \quad \text{(II.55)}$$

Cette valeur réduite Q * v donnera grâce à l'abaque (figure 84 du document « Hydraulique routière » Nguyen VAN TUU [1978], [page 262] joint en annexe 2 figure 19) la valeur de V* de laquelle l'on déduira la valeur de la vitesse V recherchée à partir de la relation suivante :

$$V = KV * I^{\frac{1}{2}} B^{\frac{1}{2}} \quad \text{(II.56)}$$

La formule générale applicable dans le cas d'un dalot fonctionnant avec une sortie noyée est la suivante (obtenue par application du théorème de Bernoulli entre les cotes amont et aval de l'ouvrage):

$$\Delta H = Q\,2 / 2g\,S\,m^2\,(Ke + (2gL/K\,2Rh^{4/3}) + 1 \quad \text{(II.57)}$$

Avec :

ΔH = surélévation ou différence entre la cote amont et la cote aval ;

Q = débit en m^3 /s ;

Sm = section mouillée en m^2 ;

L = longueur de l'ouvrage en m ;

K = le coefficient de rugosité Rh = rayon hydraulique ;

Ke = coefficient d'entrée du dalot :

- Ke = 0,4 pour dalots avec murs en aile inclinés de 30 à 75° sur l'axe avec toit à bord franc;
- Ke = 0,2 pour dalots avec murs en aile inclinés de 30 à 75° sur l'axe avec toit à bord arrondi;

Pour un dalot rectangulaire de largeur B, de hauteur D et de longueur L,

On a: $$Sm = BD \quad \text{(II.58)}$$

$$Pm = 2(B + D) \quad \text{(II.59)}$$

Et le rayon hydraulique est

$$Rh = BD/2(B + D) \quad \text{(II.60)}$$

En pratique, connaissant le débit Q et la vitesse limite (maximum 3 m/s dans les dalots), on détermine par itération B et D de telle sorte que la surélévation soit compatible avec le projet. Pour faciliter la réalisation, le rapport D/B est limité à des valeurs « rondes » comprises entre 0,5 et 2.

CHAPITRE III : APPLICATION DES NOTIONS HYDROLOGIQUES DANS LA ZONE DU PROJET

Dans ce chapitre, nous allons présenter la zone d'Etude du bassin versant de MUSASA, leur situation géographique et climatique, ainsi que leur détermination de l'hydrogramme et hyétogramme d'étude en utilisant l'une des différentes méthodes dites méthode de l'indice w et la méthode de Curve Number (CN) du Soil Conservation Service (SCS).

III.1. Délimitation du bassin versant

Notre zone d'étude couvre quatre communes à savoir Rutovu, Rutana, Bukemba et la commune Gitanga. L'exutoire se trouve à Bugiga. Le bassin versant de la rivière MUSASA se situe au sud entre 3°52'4" et 4°38'30" de latitude et 29°48'58" et 30°01'58" de longitude Est et l'altitude moyenne est de 1260m. Notre zone d'étude à une superficie de 238.053km^2 et un périmètre de 90,6Km obtenue à l'aide de logiciel Arc Gis version 10.3.

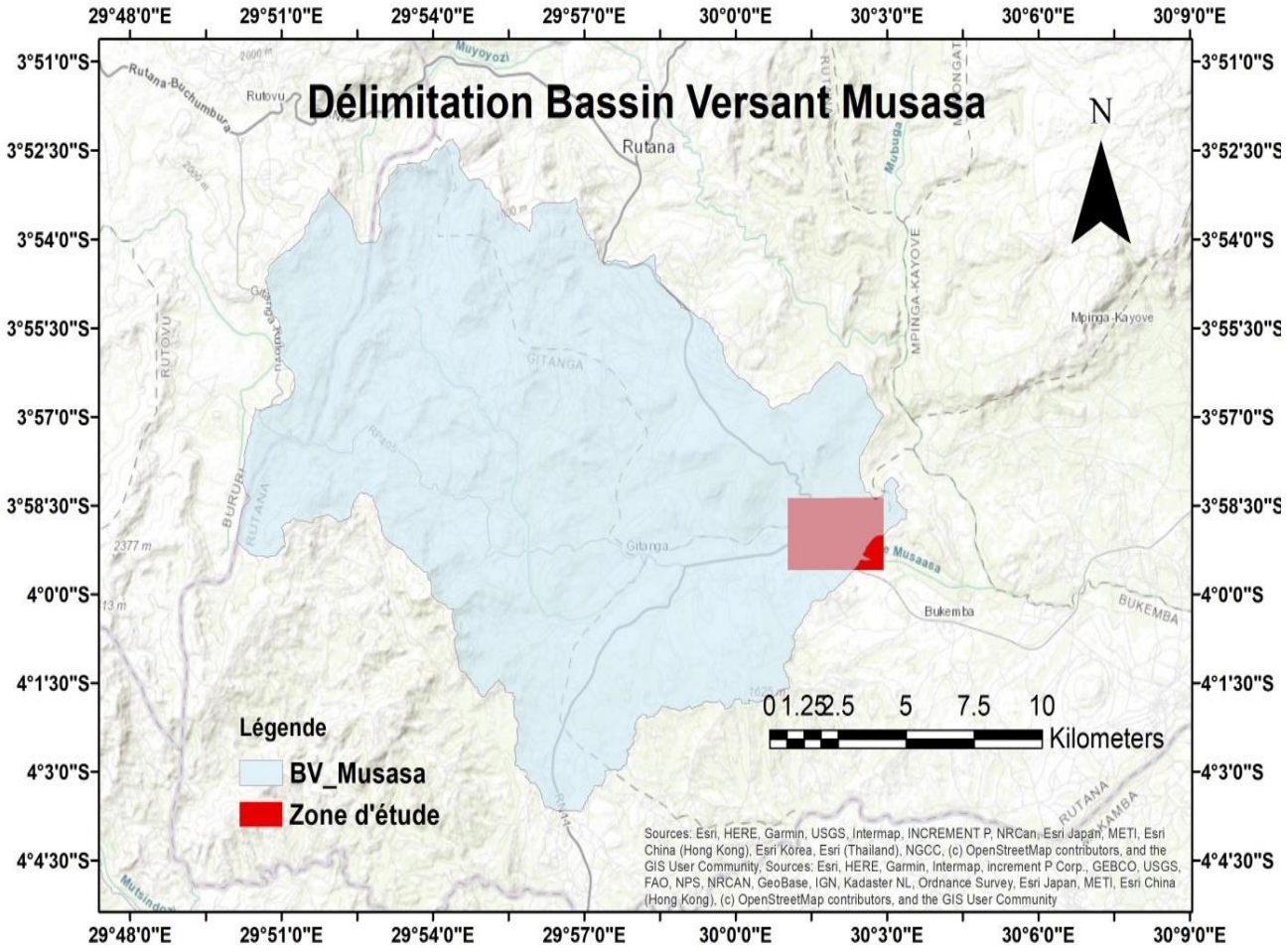


Figure III. 1 : Localisation de la zone d'étude

III.2. Situation géographique de la zone d'étude

La rivière MUSASA est une rivière à caractère torrentiel qui coule de l'Est au sud et se jette dans la rivière Mutsindozi. Elle draine un bassin versant topographique de 238,053 km2 inscrit dans un rectangle localisé géographiquement entre 29°20'52,20'' et 29°26'24,42'' de longitude Est et 03°23'36,71'' et 03°25'32,27'' de latitude Sud.

La grande partie du bassin versant de la rivière MUSASA est montagneuse comme le montre la carte hypsométrique, la carte des pentes, la carte topographique. Ces dernières ont été générées sous Arc GIS 10.3 sur base du modèle numérique de terrain (MNT) fourni par le Bureau de Centralisation Géomatique (BCG) du Burundi. Les figures suivantes (Figure III.2, Figure III.3 et Figure III.4) représentent successivement la carte hypsométrique, la carte des pentes et la carte topographique du bassin versant de la rivière MUSASA :

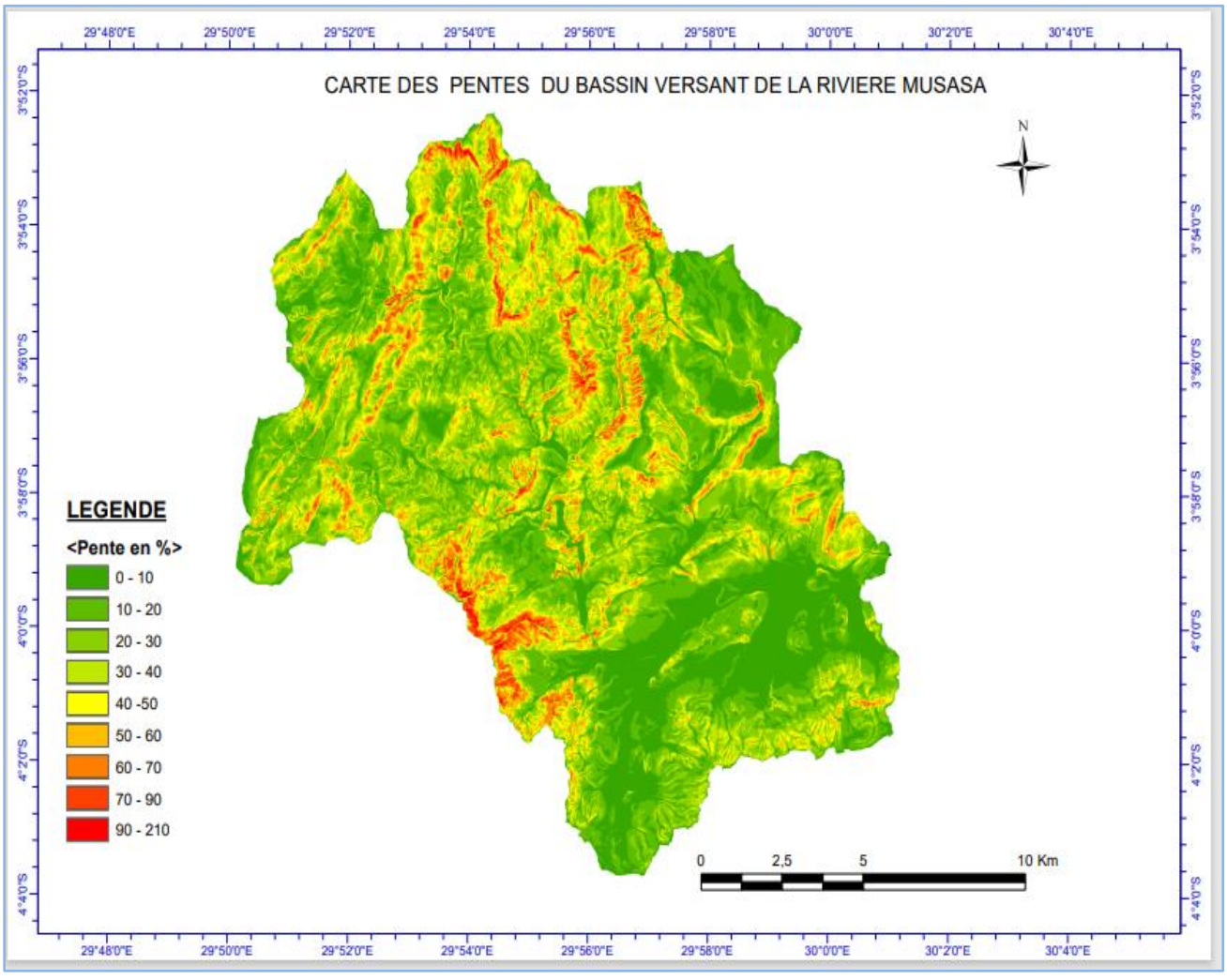


Figure III. 2 : Carte des pentes de la zone d'étude

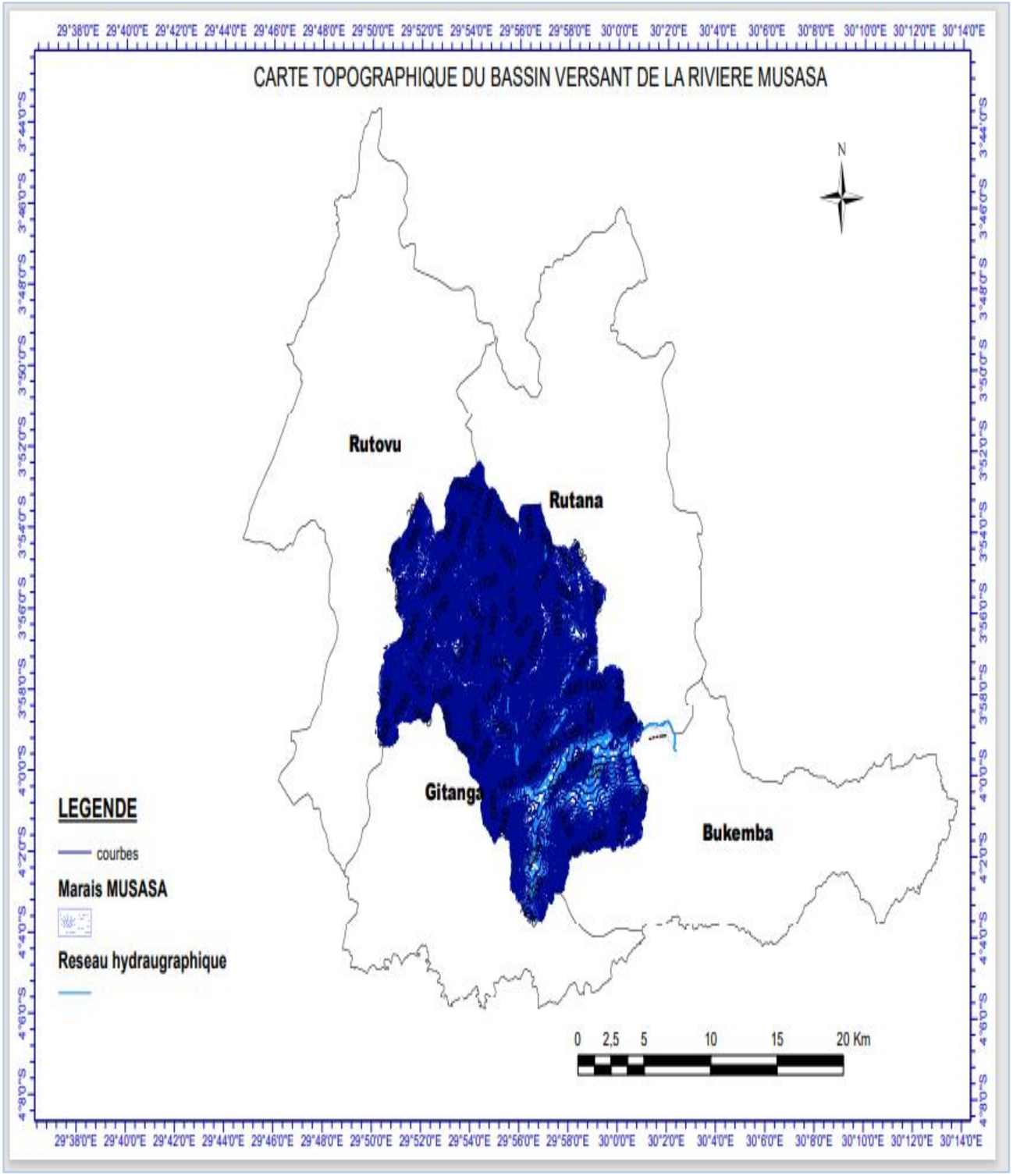


Figure III. 3 : Carte topographique de la zone d'étude

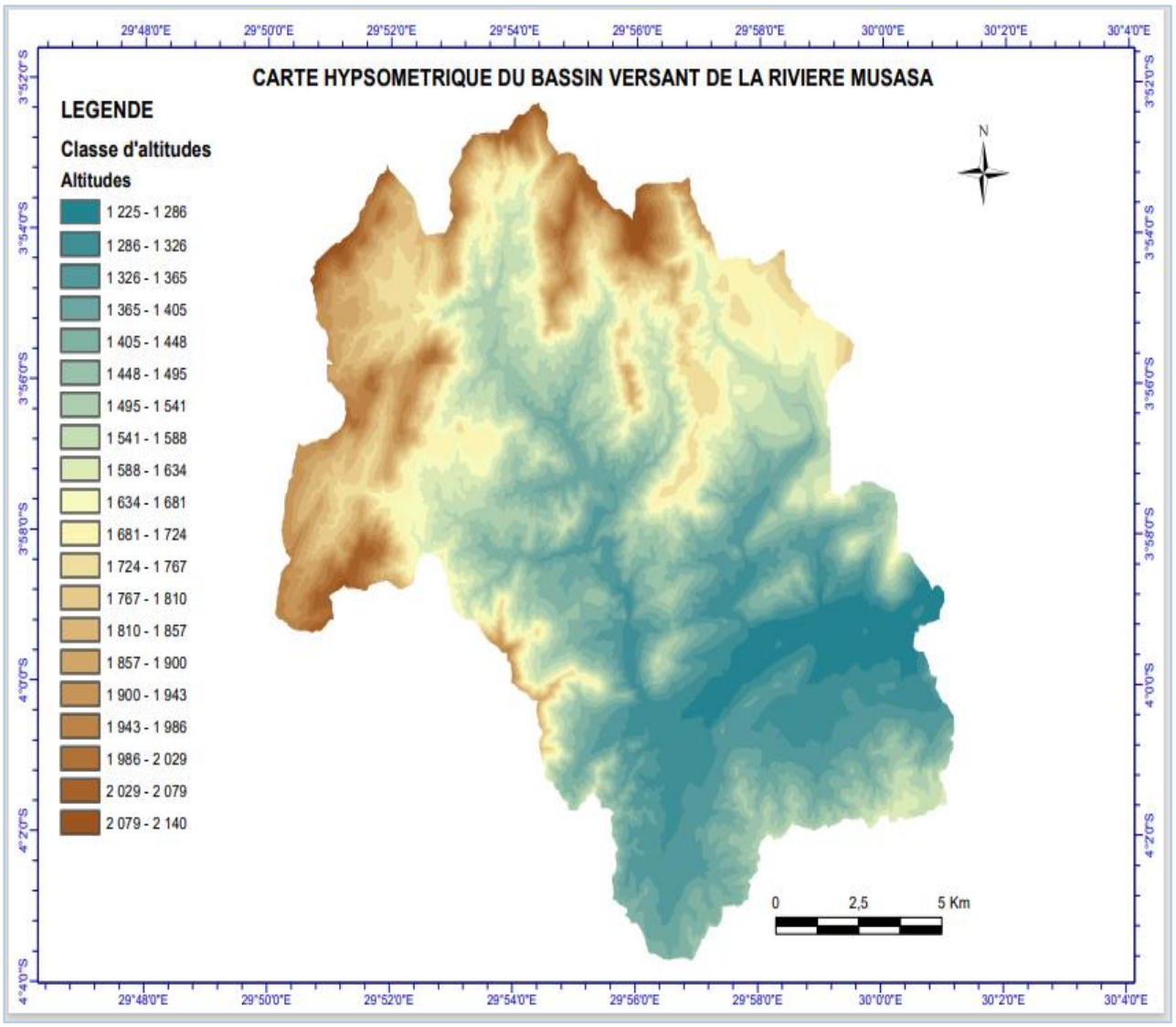


Figure III. 4 : Carte hypsométrique du bassin versant MUSASA

III.3. Situation climatologique

III.3.1. Climat du Burundi

De part, sa position géographique très proche de l'équateur, le Burundi devrait normalement connaitre un climat caractérisé par des précipitations très abondantes et de faibles amplitudes thermiques. Cependant ce climat est légèrement modifié par l'altitude et dépend largement de la circulation atmosphérique intertropicale dominée par le front intertropical de convergences (FIT) résultant de la mêlée entre l'Alizé du sud-est humide et des vents du Nord -Est secs, déviés vers le Sud à leur passage à l'équateur.

Le climat du Burundi, de type subéquatorial, est tempéré par l'altitude. Une saison des pluies s'étalant du mois d'Octobre à Mai suivi d'une saison sèche s'étalant de Juin à Septembre ; les

précipitations sont abondantes sur les sommets situés en amont des bassins versant situés vers les hauteurs et diminuent sur les plateaux orientaux dans la zone Est du pays.

II1.3.2. Pluviométrie

La pluviométrie est analysée à la station dans la zone d'études (MUSASA-BUGIGA) sur une période de 20ans (c'est-à-dire de 2001-2021) d'observation. Ainsi, la pluviométrie de cette zone est donnée par les précipitations journalières recueillies pour la présente étude sont celles de la station MUSASA. Après le traitement des données, les précipitations journalières sont reprises dans le tableau III.1 et la figure correspondante montre la variation de ces précipitations journalières dans la zone d'étude selon la période d'observation.

III.3.3. Station météorologique de MUSASA

Tableau III. 1 : Hauteurs Maxima journalières et annuelles des précipitations de MUSASA entre les années (2001-2021)

Année	Date	Hmax j (mm)	Ht annuelle (mm)
2001	21/04/2001	54.44	1146.31
2002	14/12/2002	70.88	1148.00
2003	22/11/2003	74.03	910.32
2004	24/01/2004	63.00	1111.53
2005	27/01/2005	48.06	738.21
2006	22/11/2006	55.81	1282.10
2007	07/01/2007	88.04	964.00
2008	27/03/2008	48.28	956.45
2009	11/11/2009	60.00	1106.36
2010	03/05/2010	50.00	1083.32
2011	08/04/2011	39.80	936.71
2012	10/12/2012	57.07	815.19
2013	02/03/2013	52.05	1461.45
2014	17/12/2014	67.71	1140.13
2015	07/12/2015	114.80	1261.80
2016	25/11/2016	49.08	944.94
2017	11/05/2017	56.72	1274.18
2018	22/11/2018	66.63	1215.16
2019	16/01/2019	96.00	1196.12
2020	18/04/2020	94.03	1170.70
2021	03/03/2021	81.01	1355.83

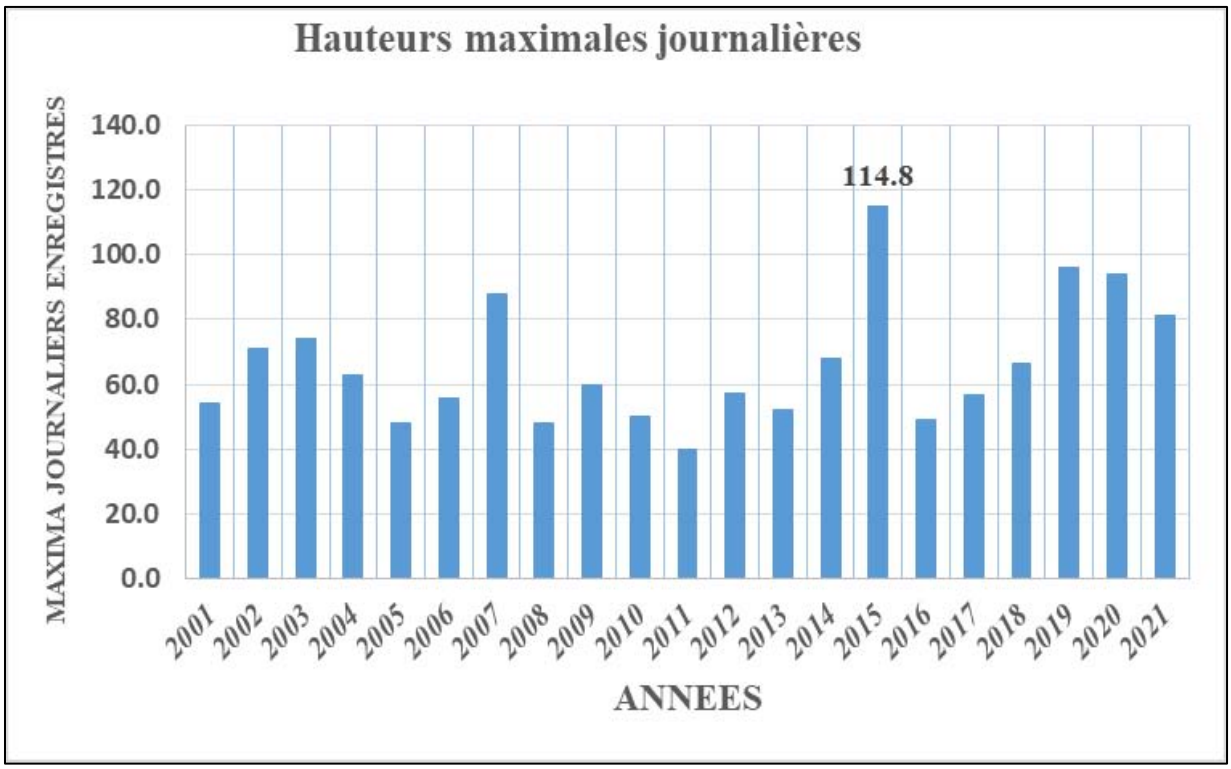


Figure III. 5 : Variation de précipitions maximales journalières de MUSASA

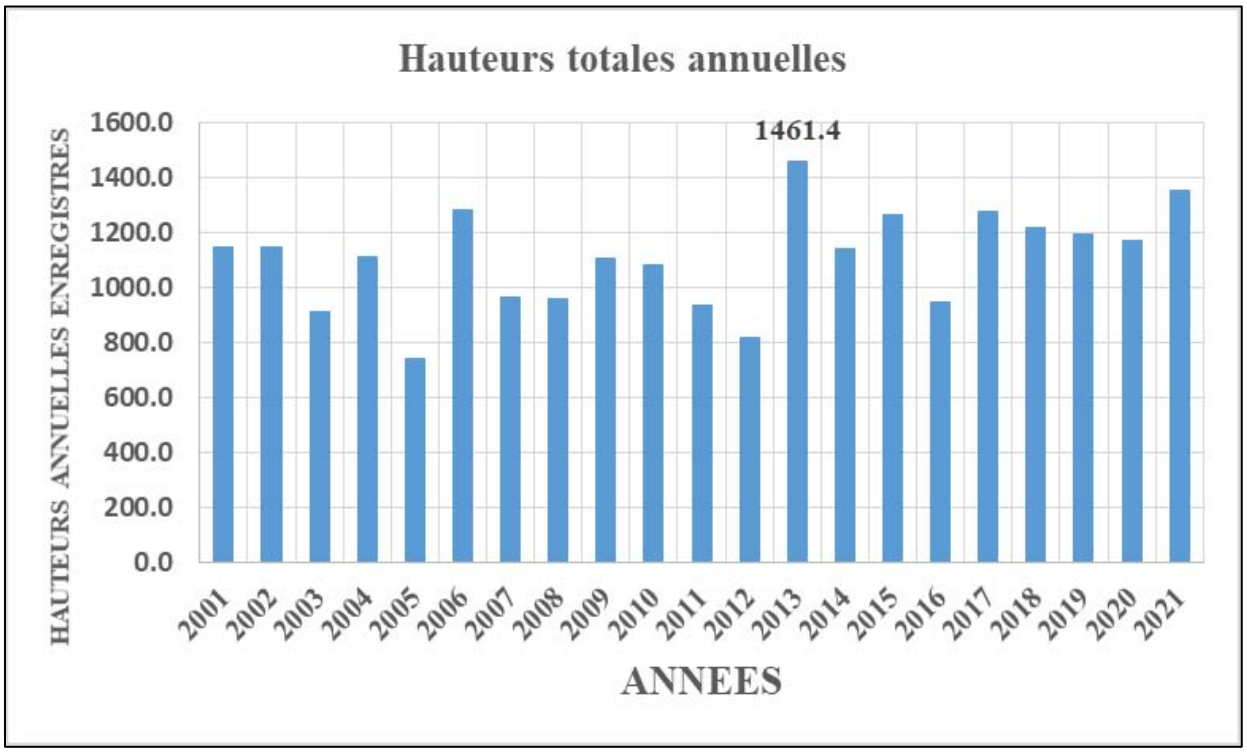


Figure III. 6 : Variation des hauteurs annuelles des précipitations MUSASA.

III.3.4. Températures

Les moyennes normales mensuelles des températures, les moyennes des minima et des maxima sont analysées sur une période de 29ans allant de 1992 à 2021 à la station de MUSASA.

Le tableau suivant montre les températures maximales, minimales et moyennes pour la période ci-dessus mentionnée :

Tableau III. 2: Variation mensuelle des températures à la station de MUSASA (1992-2021)

Mois	Temp Max	Temp Min	Temp Moy
Janvier	29.11	16.63	22.83
Février	29.03	15.55	22.29
Mars	28.92	14.12	21.51
Avril	29.23	14.81	22.03
Mai	29.60	15.40	22.5
Juin	30.51	15.46	22.93
Juillet	30.47	16.23	23.36
Août	30.96	16.25	23.57
Septembre	29.57	15.42	22.44
Octobre	29.21	15.68	22.42
Novembre	29.19	15.80	22.41
Décembre	29.51	16.11	22.86

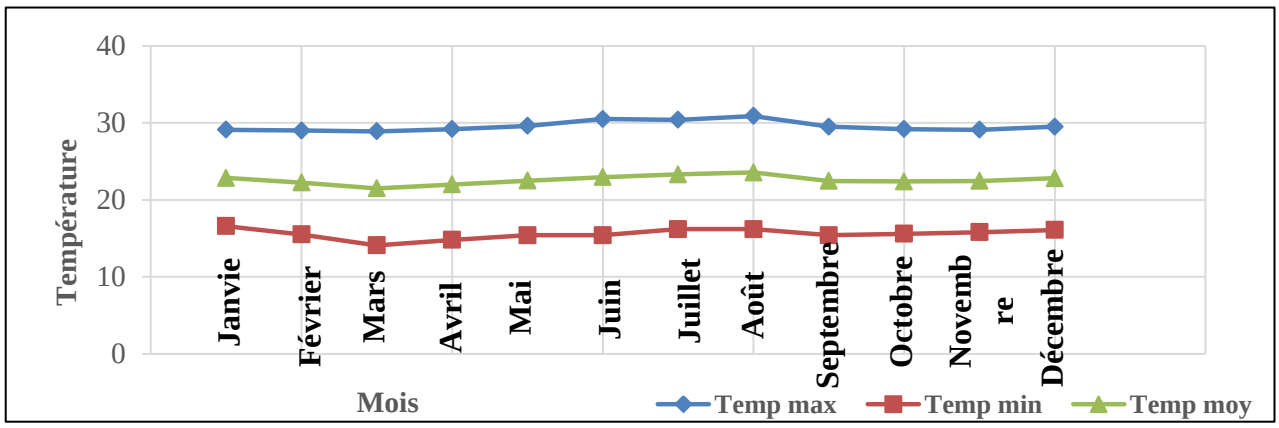


Figure III. 7 : Variation mensuelle de température

Ce graphique ci -haut montre la variation des températures sur toute la période considérée.

Comme conclusion ; Les résultats de l'analyse des températures montrent que le mois le plus chaud dans la région du présent travail est le mois d'Août avec un maximum de 30.96°C tandis que le moi relativement frais est le mois de Mars avec un minimum de 14.12°C.

III.3.5. Humidité relative de l'air

Elle exprime le rapport en pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa) à la pression de la vapeur saturante (Pr) dans les mêmes conditions de mesure de température et de pression.

Tableau III.3 : Humidité relative de l'air à la station MUSASA (1997-2021)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
HR (%)	77.71	76.43	71.00	72.78	71.25	64.41	68.94	69.00	70.41	73.52	76.36	77.44

Les données sur le paramètre d'humidité relative de l'air est disponible à la station météorologique MUSASA et sur une période de 24 ans, de 1997 à 2021. La valeur moyenne est de 72.8%. Ces paramètres relatifs à l'air affichent un maximum de 72.78% au mois d'Avril, période de la saison de pluies et un minimum de 64.41 % au mois de juin en pleine saison sèche.

En vue de bien illustrer le comportement de ces paramètres climatique, l'analyse graphique ci-dessous en illustre la répartition de l'humidité relative de l'air (figure III.8)

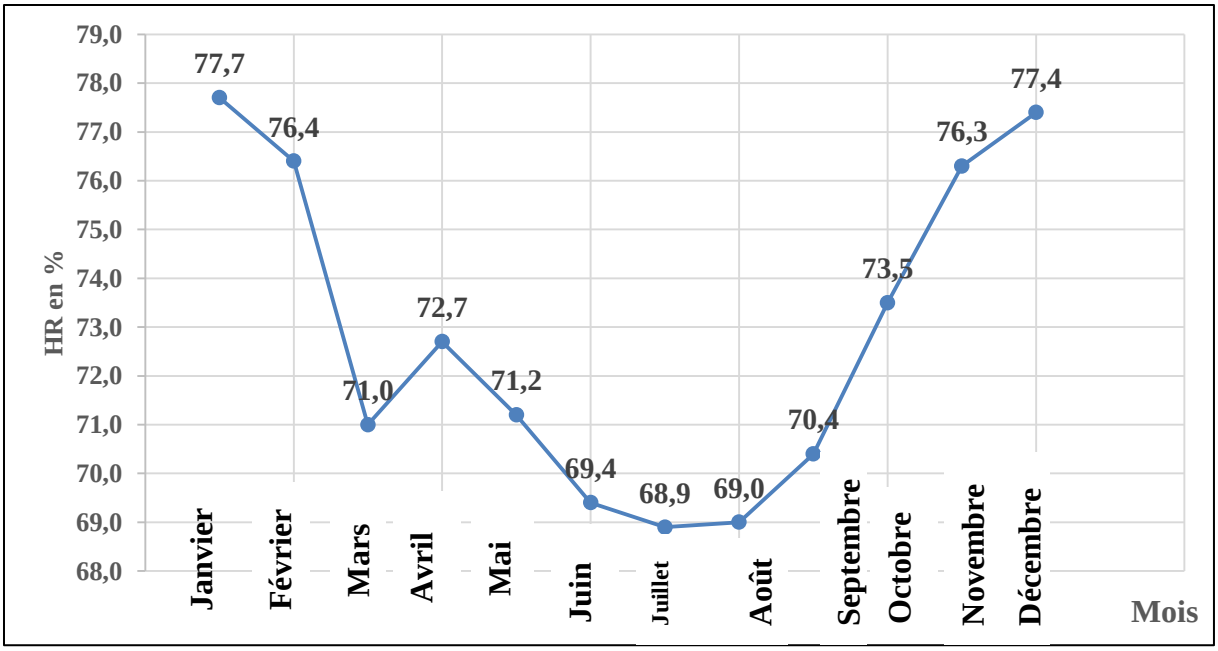


Figure III. 8 : Humidité relative de l'air à la station MUSASA (Période 1997-2021)

III.3.6. Relief de la rivière MUSASA

Il représente en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains et est par la courbe hypsométrique ; cette courbe s'obtient en portant ordonné une altitude donnée et en abscisse la surface du bassin qui se trouve au-dessus de cette altitude.

Le tableau qui suit montre la répartition de la superficie du Bassin Versant MUSASA en fonction des altitudes. Les surfaces du bassin versant ont été mesurées à l'aide de logiciel Arcgis.103.

Tableau III. 4: Répartition de la surface du Bassin versant MUSASA en fonction des altitudes

Altitudes (m)	S (Km^2)	S(%)
1286.9	9.60	4%
1326.4	25.22	11%
1365.8	46.41	20%
1405.3	65.43	27%
1448.3	85.86	36%
1495.0	104.21	44%
1541.6	121.63	51%
1588.2	139.27	58%
1634.9	153.81	65%
1681.5	166.53	70%
1724.5	180.06	76%
1767.6	191.79	81%
1810.6	201.61	85%
1857.3	211.05	89%
1900.3	218.82	92%
1943.4	226.13	95%
1986.4	234.56	97%
2079.7	237.12	99%
2140.7	238.01	100%

L'altitude fait partie des caractéristiques morphométriques du bassin versant. Elle est matérialisée sur une courbe hypsométrique qui montre 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 *(Laborde, 2009).*

Pour avoir la courbe hypsométrique, il faut la répartition de la superficie en fonction des altitudes.

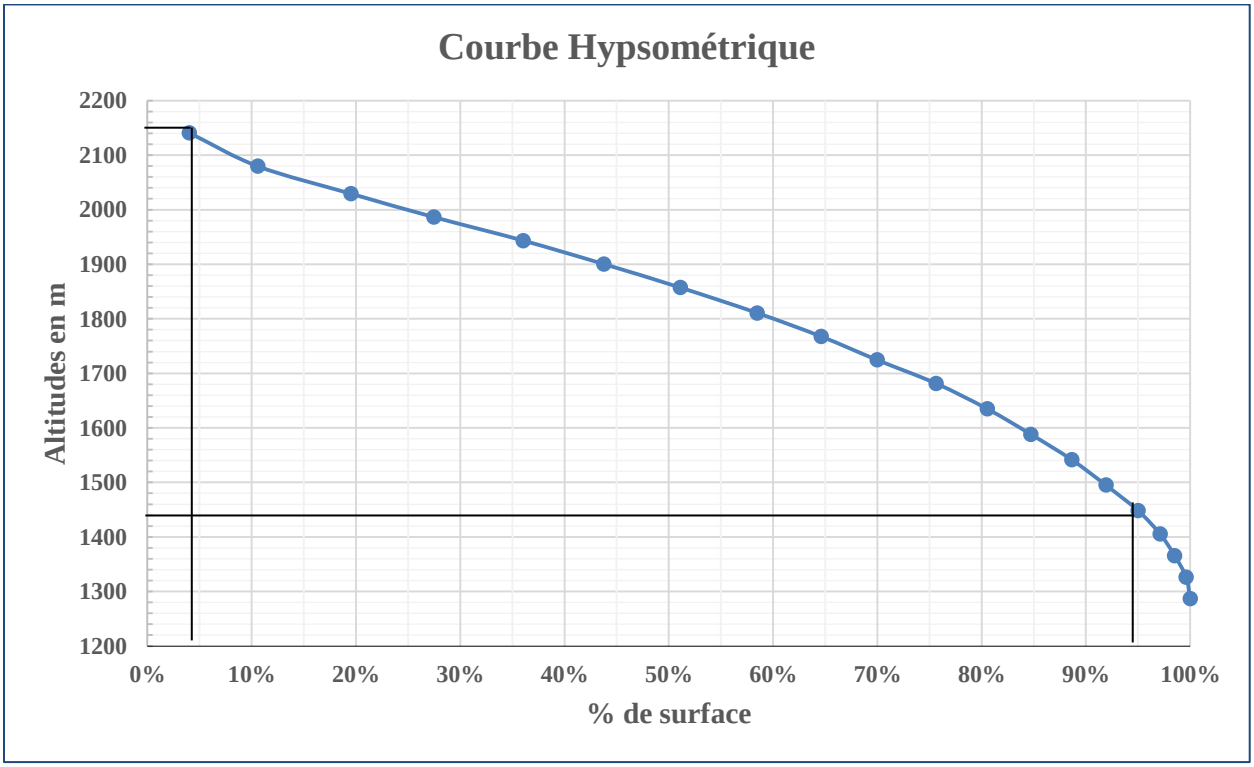


Figure III. 9 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière MUSASA

Le graphique de la courbe hypsométrique permet d'avoir les paramètres suivants :

a) Altitude moyenne

C'est le rapport de la somme des surfaces élémentaires de l'altitude moyenne par la surface totale du bassin versant.

$$H = \Sigma\ (Hi * ai)/A \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

H : altitude moyenne

H_i : altitude moyenne entre 2 courbes de niveau ;

A : aire totale du bassin versant ;

a_i : surface élémentaire entre deux courbes de niveau.

A partir de la courbe, les altitudes sont trouvées :

- H5% ;
- H95%.

b) Dénivelée simple

$$D = H5\% - H95\% \quad \text{(III.2)}$$

D = 2.01Km

c) Pente moyenne

Parmi les méthodes les plus utiles pour le calcul de la pente moyenne d'un bassin, celle que l'on rencontre le plus souvent est :

$$Imoy = \frac{It*H}{A} \quad \text{(III.3)}$$

Où

I_t : somme de longueurs de toutes les courbes de niveau ;

A : Surface ;

H : intervalle entre deux courbes de niveau.

$$I = \frac{\Delta Z}{L} \quad \text{(III.4)}$$

Où

ΔZ : Dénivelée totale ;

L : longueur du rectangle équivalent.

d) Indice de pente

Partant de la notion du rectangle équivalent, DURET définit un indice de pente qui tient compte de la totalité du relief.

$$Ip = \frac{D}{Leq} = \frac{(D5\% - D95\%)}{leq} \quad \text{(III.5)}$$

Où

I_P : indice de pente ;

$L_{éq}$: longueur du rectangle équivalent

D5% et D95% : dénivelée.

III.4. Quelques paramètres des hauteurs maximales journalières et annuelles de MUSASA

Tableau III. 5 : Hauteurs maximales journalières et annuelles de MUSASA

Paramètres (mm)		
Maxima journaliers	Max(Hmax j)	114.81
	Moy(Hmax j)	66.01
	Min(Hmax)	39.83
Totaux annuelles	Max(Hmax j)	1461.45
	Moy(Hmax j)	1105.66
	Min(Hmax)	738.28

Pour cette étude, nous nous sommes servis des données climatiques de la station météorologique de MUSASA. Ces données émanant de l'IGEBU sont les précipitations journalières P24 (mm) [2001-2021] soit 20ans, les températures maximales et minimales journalières (°C) [1997-2021] soit 24ans et les humidités relatives maximales et minimales journalières (%) [1992-2021] soit 29 ans.

Le temps des précipitations est estimé à 24heures d'où l'appellation P24. 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.

III.5. Classement de dix plus grandes hauteurs maxima journalières de la station MUSASA

Tableau III. 6 : Classement de dix grand maxima journaliers pour la station MUSASA

Ordre	Valeurs (mm)	Date
1	66.60	22/11/2018
2	67.70	17/12/2014
3	70.80	14/12/2002
4	74.00	22/112003
5	81.00	03/03/2021
6	88.00	07/01/2007
7	94.00	18/04/2020
8	96.00	16/01/2019
9	114.80	17/12/2014
10	114.80	07/122015

III.6. Prédétermination de la hauteur du projet par la loi des extrêmes de GUMBEL

Dans notre projet, la loi de GUMBEL sera appliquée aux maximas journaliers, ce qui permettra de calcul les intensités d'averses exceptionnelles à utiliser dans le dimensionnement des ouvrages d'assainissement.

D'après cette loi, la probabilité de non dépassement d'une quantité Q est donnée par :

$$F(Q) = e^{-e^{-u}} \qquad \text{(III.6)}$$

Les différents paramètres utilisés sont donnés par les équations ci-dessous :

$u = \alpha(Q - Q_0)$	$\overline{Q} = \frac{\sum_i^N Q_i}{N}$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Q_i - \overline{Q})^2}{N-1}}$
$\alpha = (0{,}780\sigma)\text{^}(-1)$	$Q_0 = \overline{Q} - 0{,}45\sigma$	$Q(T) = \frac{u}{\alpha} + Q_0$

La quantité Q dans notre projet représente la hauteur maximale journalière des précipitations sur une année.

Tableau III.7 : Paramètres d'ajustement des hauteurs suivant la loi des extrêmes de GUMBEL

Désignation	Symbole	Unités	Valeurs
Moyenne	$H_{max,\ moy}$	mm	66.03
Ecart-type	Σ		19.21
Paramètre 1	A		0.06
Paramètre 2	H0	mm	57.39

III.6.1. Choix de la période de retour

Dans les projets du génie civil portant sur diverses structures hydrauliques, on se réfère couramment aux débits ayant une période d'occurrence donnée. Cette dernière étant la période moyenne en année durant laquelle on s'attend à ce qu'un certain débit soit égal ou dépassé.

La période d'occurrence est choisie en fonction de l'importance de l'ouvrage (économie) et du risque hydrologique. Ce dernier représente la probabilité qu'un critère de conception soit dépassé au moins une fois pendant la période de retour (T) calculée. [13]

III.6.2. Résultats sur une période de 100ans

Tableau III. 8 : Hauteurs maximales annuelles générées par la loi des extrêmes de GUMBEL

Résultats sur une période de 100 ans			
T	$F = 1 - \frac{1}{T}$	$u = -\ln(-\ln(F))$	H(mm)
5	0.8000	1.500	79.87
10	0.9000	2.250	91.12
15	0.9333	2.674	97.46
20	0.9500	2.970	101.91
25	0.9600	3.199	105.33
30	0.9667	.384	108.11
50	0.9800	3.902	115.87
75	0.9867	4.311	122.00
100	0.9900	4.600	126.336

III.7. Calcul du temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe à un point élevé du bassin versant pour atteindre l'exutoire.

D'après l'utilisation des formules précédentes se trouvant à la page 15 sur la notion du temps de concentration on voit que le temps de concentration de notre bassin versant varie entre 100min et 397 min, prenons le temps de concentration t_c=320mim.

III.8. Notion d'un hyétogramme synthétique

Un hyétogramme synthétique ou orage modèle est un histogramme représentant la variation de l'intensité en fonction du temps au cours d'une averse de durée t. Les caractéristiques importantes d'un hyétogramme sont :

- Le débit de pointe ;
- Le temps de point ;
- La répartition dans le temps ;
- La durée ;
- Le volume ou hauteur totale ;
- La fréquence d'occurrence.

Cependant, multiples méthodes probables de fournir un bon résultat de l'intensité de projet sont proposées par certains chercheurs en vue de la construction d'un hyétogramme synthétique affèrent à une région donnée de la planète .On peut élucider :

- La méthode de Huff ;
- La méthode des Curve Number (CN) du Soil Conservation Service (SCS) ;
- La méthode de YEN et CHOW ;
- La méthode synthetic Block Hyetograph(SBH) ;
- La méthode de CHICAGO.

La méthode préférée parmi ces différentes méthodes est celle de Huff à cause de sa simplicité.

III.9. Méthode de Huff

Huff (1967) a développé des distributions de pluie pour les averses importantes dans l'Illinois pour les superficies pouvant atteindre 1035km^2, selon Huff les intensités de la pluie sont reparties en quatre quartiles selon lesquels le maximum des intensités se produit dans le premier,deuxième,troisième ou quatrième quartile de la durée de l'averse comme le montre la figure III-10 [Huff, 1967] ci-dessous :

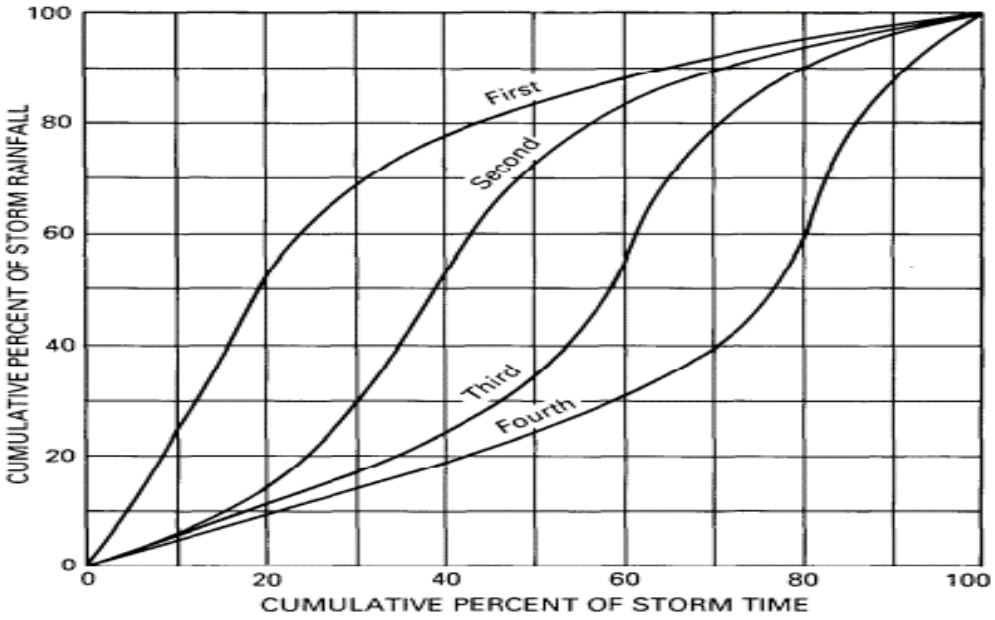


Figure III. 10 : Distribution des précipitations selon la méthode de Huff (1967)

La méthode de Huff utilise trois ensembles de distribution. Pour chaque ensemble de distribution; selon la taille du bassin. Les trois ensembles de distribution du plus grand au plus petit sont : 50 à 400 mi^2, 10 à 50 mi^2 et <10mi^2 ou « point rainfall », quatre différentes courbes médianes de distribution existent et sont nommées Quartile I, Quartile II,Quartile III et QuartileIV. Le tableau suivant présente la distribution des précipitations en fonction du temps pour une probabilité de 50% (correspondant à la courbe médiane) pour les trois grands ensembles.

Selon Floyd A. et Huff (1990), si on se réfère à l'analyse fréquentielle de la durée de chacune des quatre types d'averse, les recommandations pour le choix du quartile devraient être comme indiquées ci-dessous :

- le premier et le deuxième quartile sont mieux indiqués pour des averses de durée inférieure ou égale à 12 heures. L'étude statistique a montré que pour des averses de durée inférieure ou égale à 6heures, le premier quartile est plus représenté alors que pour les averses de durée variant de 6,1 à 12 heures, le second quartile domine ;
- le troisième quartile est mieux indiqué pour les averses de durée comprise entre 12,1 et 24heures ;
- le quatrième quartile est recommandé pour des averses de durée supérieure à 24heures.

Néanmoins, il est à noter qu'une averse particulière peut se retrouver dans l'une ou l'autre des quatre types de distribution.

III.10. Hyétogramme de projet

L' hyétogramme permet pour des bassins versants étendus (>5km²), de prendre en compte la répartition temporelle de l'averse ainsi que de la forme du bassin versant, le bassin versant de notre d'étude à une superficie égale à 238,05km^2. L'observation de la pluviométrie locale montre que le pic de l'intensité a eu lieu dans le 2ème quartile.

Méthode de Huff				
Areas	**50 à 400 mi2**			
t/T (%)	QI	QII	QIII	QIV
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	8.00	2.00	2.00	2.00
10.00	17.00	4.00	4.00	3.00
15.00	34.00	8.00	7.00	5.00
20.00	50.00	12.00	10.00	7.00
25.00	63.00	21.00	12.00	9.00
30.00	71.00	31.00	14.00	10.00
35.00	76.00	42.00	16.00	12.00
40.00	80.00	53.00	19.00	14.00
45.00	83.00	64.00	22.00	16.00
50.00	86.00	73.00	29.00	19.00
55.00	88.00	80.00	39.00	21.00
60.00	90.00	86.00	54.00	25.00
65.00	92.00	89.00	68.00	29.00
70.00	93.00	92.00	79.00	35.00
75.00	95.00	94.00	87.00	43.00
80.00	96.00	96.00	92.00	54.00
85.00	97.00	97.00	95.00	75.00
90.00	98.00	98.00	97.00	92.00
95.00	99.00	99.00	99.00	97.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

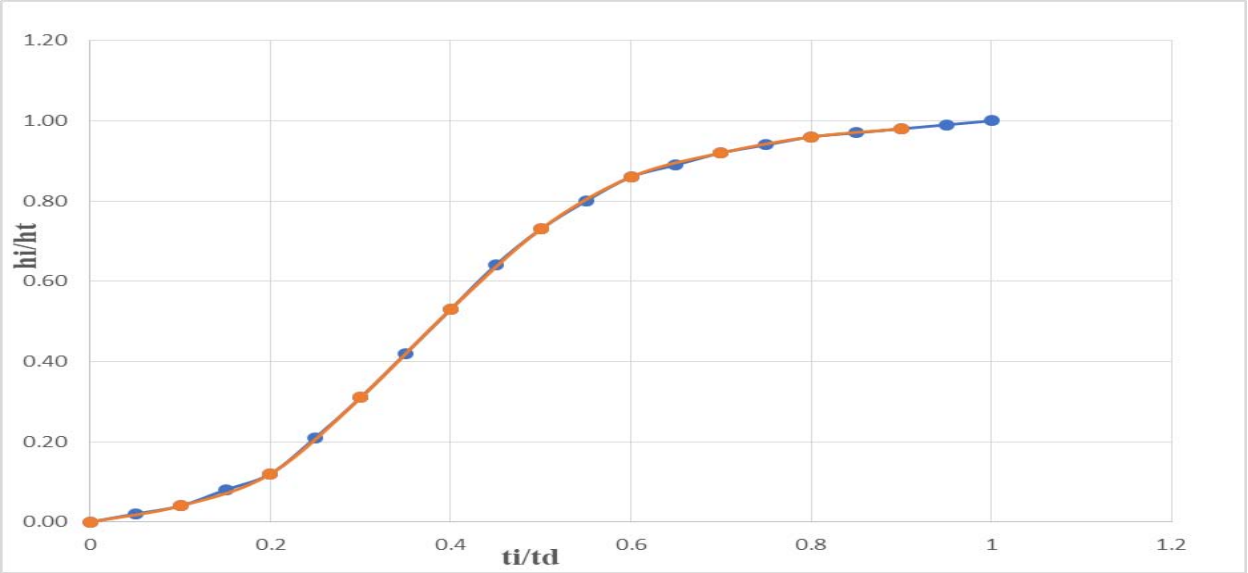


Figure III.11 : Courbe médiane de distribution des précipitations de MUSASA selon Huff

L'intensité variable est déduite de l'intensité constante qui, elle est donnée par la courbe IDF (Intensité – durée – fréquence) de la région considérée. Ainsi ayant la durée du projet, T_d,et I, intensité ,la pluie totale est donnée par :

$$Pi = i * Td \qquad \text{(III.10)}$$

On se fixe un pas de temps Δt et partant, on obtient tout le temps ti pour lesquels on devra calculer le rapport ti/Td puis Pi/Pt. Après de longues analyses, Huff trouve que les petites durées de précipitations correspondantes à l'intensité maximale appartiennent au premier et au deuxième quartile. La figure ci-dessus illustre la détermination de l'intensité variable selon Huff (deuxième quartile).

En utilisant l'approche de Huff, nous obtenons l'hyétogramme de projet ci-dessous :

Tableau III. 9: Détermination de l'intensité d'une averse de projet MUSASA selon la méthode de Huff

ti(min)	ti/td	(h/ht)	Σhi	Hi	I(mm/h)	hn (mm)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.10	0.04	4.60	4.60	8.63	1.05
64	0.20	0.12	13.80	9.20	17.25	2.10
96	0.30	0.31	35.65	21.85	40.97	4.99
128	0.40	0.53	60.95	25.30	47.44	5.78
160	0.50	0.73	83.95	23.00	43.13	5.26
192	0.60	0.86	98.90	14.95	28.03	3.42
224	0.70	0.92	105.80	6.90	12.94	1.58
256	0.80	0.96	110.40	4.60	8.62	1.05
288	0.90	0.98	112.70	2.30	4.31	0.53
320	1.00	1.00	115.00	2.30	4.31	0.53

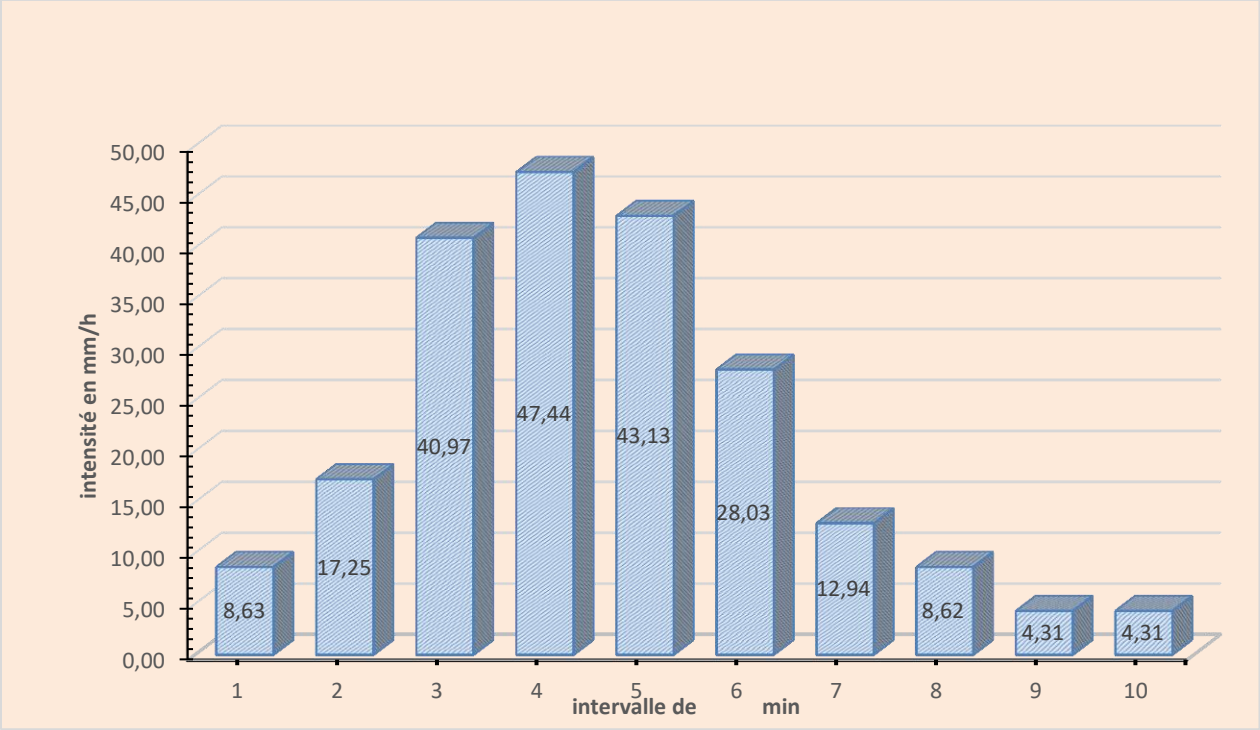


Figure III. 12: Hyétogramme de projet

III.11. Débits de crue

Il existe plusieurs méthodes d'estimation du débit de crue en l'absence de mesures sur terrain. Certaines méthodes permettent d'estimer seulement la valeur maximale du débit (débit de point) alors que d'autres méthodes permettent d'établir des hydrogrammes de sortie.

Dans une section d'un cours d'eau, un hydrogramme est la représentation graphique de la variation du débit en fonction du temps.

III.12. Passage de l'Hydrogramme Unitaire en hydrogramme synthétique

Afin d'établir l'Hydrogramme Synthétique résultant d'une averse donnée à partir de l'Hydrogramme Unitaire, il est indispensable d'avoir l'hyétogramme de la pluie nette correspondante de l'averse. L'étude des hydrogrammes de crue en fonction des hyétogrammes des averses qui les ont engendrés, ont donc conduit à formuler les propositions suivantes :

Soit I_1 l'intensité constante de la pluie nette 1et I_2 celle de la pluie nette 2. On aura :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Q_1(t)}{Q_2(t)} \qquad \text{(III.11)}$$

Supposons maintenant que l'on ait une averse de durée supérieure à la durée unitaire (t>tu), on divise l'averse en n averses unitaires de durée tu. Chacune de ses averses unitaires générera une réponse qui est affinée de l'hydrogramme unitaire dans le rapport des intensités ; chaque réponse étant déphasée de la précédente de tu.

On admettra que la réponse du bassin à cette averse de durée n.tu est égale à la somme des réponses impulsionnelles à chaque averse unitaire de durée tu : « c'est l'additivité ».

III.13. Transformation de la pluie brute en hyétogramme de la pluie nette

La relation donnant la pluie nette totale (H_N) d'une averse de hauteur totale P pour un sol dont les pertes maximales potentielles S et dont les pertes initiales I_a a été déduite de l'hypothèse suivante : « le rapport des pertes réelles ($P-H_N-I_a$) sur les quantités d'eau ruisselées (H_N) est égal au rapport des pertes maximales potentielles par infiltration (S) sur le ruissellement maximum ($P-I_a$).» Cette hypothèse est traduite mathématiquement par l'égalité suivante :

$$\frac{Pn}{P-Pn-la} = \frac{P-la}{s} \qquad \text{(III.12)}$$

Avec :

P : Précipitation totale (Pluie brute)

Ia : Pertes initiales avant submersion

Pn : Pluie nette (Précipitation participant au ruissellement Q)

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

P-Ia : Ruissellement maximum potentiel

S : Pertes maximales potentielles

Ici, les pertes réelles désignent les pertes par infiltrations. En exprimant HN par rapport aux autres termes, on trouve l'équation générale de la méthode SCS-CN :

$$H_N = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+s} \quad \text{(III.13)}$$

Par rapport aux autres paramètres, les pertes par infiltration (désignées ici par I avec I=P-HN-Ia) sont données par l'équation suivante :

$$I = \frac{SH_N}{P-Ia} \quad \text{(III.14)}$$

En remplaçant H_N par son expression, on trouve :

$$I = \frac{S(P-I_a)}{(P-I_{a)+S}} \quad \text{(III.15)}$$

Au cours d'une averse, l'infiltration cumulée au temps ti est une fonction de la hauteur d'eau brute cumulée au temps ti (P(ti)), de l'interception totale (Ia) et des pertes maximales potentielles par infiltration (S) :

$$I\ (t_i) = max\ (\frac{S[P(t_i)-I_a]}{P(t_i)-I_a+S}; 0) \quad \text{(III.16)}$$

La pluie nette cumulée à l'instant ti est égale à la pluie brute cumulée à l'instant ti moins la somme des pertes (pertes par interception cumulée et pertes par infiltration cumulée) à l'instant ti.

Comme nous avons utilisé la méthode de l'indice w pour évaluer la pluie nette (H_N), les valeurs de S, Ia et H_N sont connues d'avance et il ne reste qu'à décomposer la pluie partielle par cette méthode décrite dans le présent paragraphe.

III.14. Décomposition de l'averse pour la situation initiale (SI) d'aménagement du bassin versant MUSASA

Les caractéristiques de base indispensables pour la décomposition de l'averse en ses composantes (interception, infiltrations et pluie efficace) sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 10 : Décomposition de la pluie par la méthode SCS-CN.

Désignation	Symbole	Valeur	Unité
Surface du bassin versant à l'exutoire	A	23805	ha
Période de retour	T	50	ans
Temps de concentration	Tc	240	min
Durée de l'averse	t_d	320	min
Durée de l'averse unitaire théorique	tu calc.	32.00	min
Durée de l'averse unitaire adoptée	tu adopté	32	min
Temps de montée de l'hydrogramme	TP	160	min
Pas de temps considéré pour HU	Δt	32	min
Précipitation totale	P	115.00	mm
Déficit potentiel maximal	S	169.33	mm
Interception totale	Ia	33.87	mm
Pluie efficace totale	H_N	26.281	mm
Hauteur efficace de l'averse unitaire	Hru	1.00	mm
Débit de point de l'averse unitaire	Qpu	18.60	m^3/s
Débit de point (SCS-CN)	Qmax	468.714	m^3/s

Une fois le pas de temps choisi, nous avons décomposé l'averse en ses composantes.

III.15. Traçage de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA

L'objectif de la décomposition de la pluie totale en pluie nette distribuée par rapport au temps, le pas de temps considéré étant égal à la durée de l'averse unitaire.

En construisant l'hydrogramme de ruissellement résultant de la pluie nette, il ne reste qu'à appliquer les principes d'affinité et d'additivité par rapport à l'hydrogramme unitaire.

La figure et le tableau suivant montrent les résultats de calcul d'une crue due à une averse de 100 ans de période de retour survenue pour un sol moyennement humide.

III.16. Résultats de calcul de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA

Tableau III. 11: Résultats de calcul de l'hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA

t			Hru=1 mm	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)	h6(mm)	h7(mm)	h8(mm)	h9(mm)	Q_{Ru} (m^3/s)
	t/tp	Q/QP	Q_u	1.05	2.10	4.99	5.78	5.26	3.42	1.58	1.051	0.526	468.714
0	0.00	0.00	0.00	0.00									12.04
32	0.10	0.03	0.56	0.59	0.00								12.62
64	0.20	0.10	1.86	1.96	1.17	0.00							15.17
96	0.30	0.19	3.53	3.71	3.91	2.79	0.00						22.45
128	0.40	0.31	5.76	6.05	7.43	9.29	3.23	0.00					38.03
160	0.50	0.47	8.78	9.23	12.10	17.64	10.75	2.93	0.00				64.70
192	0.60	0.66	12.23	12.86	18.45	28.74	20.43	9.78	1.91	0.00			104.20
224	0.70	0.82	15.25	16.03	25.71	43.82	33.28	18.57	6.35	0.88	0.00		156.70
256	0.80	0.93	17.34	18.23	32.06	61.07	50.74	30.26	12.07	2.93	0.59	0.00	219.99
288	0.90	0.99	18.38	19.32	36.46	76.15	70.71	46.13	19.67	5.57	1.96	0.29	288.30
320	1.00	1.00	18.60	19.55	38.64	86.59	88.17	64.29	29.99	9.08	3.71	0.98	353.32
352	1.10	0.99	18.40	19.34	39.11	91.76	100.26	80.16	41.79	13.84	6.05	1.86	407.18
384	1.20	0.93	17.32	18.21	38.69	92.88	106.25	91.14	52.10	19.29	9.23	3.03	444.70
416	1.30	0.86	15.97	16.79	36.41	91.88	107.54	96.59	59.24	24.05	12.86	4.61	465.04
448	1.40	0.78	14.52	15.26	33.58	86.48	106.39	97.77	62.78	27.34	16.03	6.43	468.71
480	1.50	0.68	12.65	13.29	30.52	79.75	100.13	96.72	63.55	28.98	18.23	8.02	457.66
512	1.60	0.56	10.41	10.95	26.59	72.49	92.35	91.03	62.87	29.33	19.32	9.11	434.09
544	1.70	0.46	8.56	8.99	21.90	63.15	83.94	83.95	59.17	29.02	19.55	9.66	400.48
576	1.80	0.39	7.25	7.63	17.99	52.01	73.12	76.31	54.57	27.31	19.34	9.78	359.74
608	1.90	0.33	6.14	6.45	15.25	42.72	60.22	66.47	49.60	25.19	18.21	9.67	315.59

640	2.00	0.28	5.21	5.47	12.91	36.22	49.47	54.74	43.21	22.89	16.79	9.10	272.51
672	2.10	0.24	4.53	4.76	10.95	30.65	41.94	44.97	35.58	19.94	15.26	8.40	233.60
704	2.20	0.21	3.85	4.05	9.53	26.00	35.49	38.13	29.23	16.42	13.29	7.63	200.21
736	2.30	0.17	3.24	3.41	8.10	22.63	30.11	32.26	24.78	13.49	10.95	6.65	172.04
768	2.40	0.15	2.73	2.87	6.81	19.23	26.20	27.37	20.97	11.44	8.99	5.47	148.05
800	2.50	0.13	2.33	2.45	5.75	16.18	22.26	23.82	17.79	9.68	7.63	4.50	127.57
832	2.60	0.11	1.99	2.09	4.89	13.66	18.74	20.24	15.48	8.21	6.45	3.81	110.11
864	2.70	0.09	1.70	1.79	4.19	11.61	15.81	17.04	13.15	7.15	5.47	3.23	95.29
896	2.80	0.08	1.43	1.51	3.57	9.94	13.45	14.37	11.07	6.07	4.76	2.74	82.76
928	2.90	0.06	1.19	1.26	3.01	8.49	11.51	12.23	9.34	5.11	4.05	2.38	72.16
960	3.00	0.05	1.02	1.07	2.51	7.16	9.83	10.47	7.95	4.31	3.41	2.02	63.15
992	3.10	0.05	0.86	0.91	2.14	5.96	8.29	8.94	6.80	3.67	2.87	1.70	55.35
1024	3.20	0.04	0.73	0.77	1.82	5.08	6.91	7.54	5.81	3.14	2.45	1.44	48.68
1056	3.30	0.03	0.62	0.65	1.54	4.32	5.88	6.28	4.90	2.68	2.09	1.22	43.04
1088	3.40	0.03	0.52	0.55	1.31	3.66	5.00	5.35	4.08	2.26	1.79	1.05	38.30
1120	3.50	0.02	0.44	0.46	1.10	3.10	4.24	4.54	3.48	1.88	1.51	0.89	34.30
1152	3.60	0.02	0.37	0.39	0.93	2.62	3.59	3.86	2.95	1.60	1.26	0.75	30.88
1184	3.70	0.02	0.30	0.32	0.77	2.20	3.03	3.27	2.51	1.36	1.07	0.63	27.94
1216	3.80	0.01	0.25	0.26	0.64	1.83	2.55	2.76	2.12	1.16	0.91	0.53	25.42
1248	3.90	0.01	0.20	0.21	0.52	1.51	2.12	2.31	1.79	0.98	0.77	0.45	23.25
1280	4.00	0.01	0.20	0.22	0.42	1.24	1.75	1.93	1.50	0.83	0.65	0.39	21.42
1312	4.10	0.01	0.18	0.19	0.43	1.00	1.43	1.59	1.25	0.69	0.55	0.33	19.89
1344	4.20	0.01	0.16	0.17	0.38	1.02	1.16	1.30	1.04	0.58	0.46	0.28	18.74
1376	4.30	0.01	0.14	0.14	0.33	0.90	1.18	1.05	0.85	0.48	0.39	0.23	17.87

1408	4.40	0.01	0.11	0.12	0.28	0.79	1.05	1.08	0.68	0.39	0.32	0.19	17.17
1440	4.50	0.01	0.09	0.10	0.24	0.68	0.91	0.95	0.70	0.32	0.26	0.16	16.54
1472	4.60	0.00	0.07	0.08	0.20	0.57	0.78	0.83	0.62	0.32	0.21	0.13	15.93
1504	4.70	0.00	0.05	0.06	0.15	0.46	0.66	0.71	0.54	0.29	0.22	0.11	15.36
1536	4.80	0.00	0.03	0.04	0.11	0.36	0.54	0.60	0.46	0.25	0.19	0.11	14.80
1568	4.90	0.00	0.02	0.02	0.07	0.27	0.42	0.49	0.39	0.21	0.17	0.10	14.28
1600	5.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.17	0.31	0.38	0.32	0.18	0.14	0.08	13.76
1632	5.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.20	0.28	0.25	0.15	0.12	0.07	13.28
1664	5.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.18	0.18	0.11	0.10	0.06	12.85
1696	5.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.12	0.08	0.08	0.05	12.52
1728	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.04	12.29
1760	5.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.03	12.17
1792	5.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	12.10
1824	5.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	12.07
1856	5.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.05

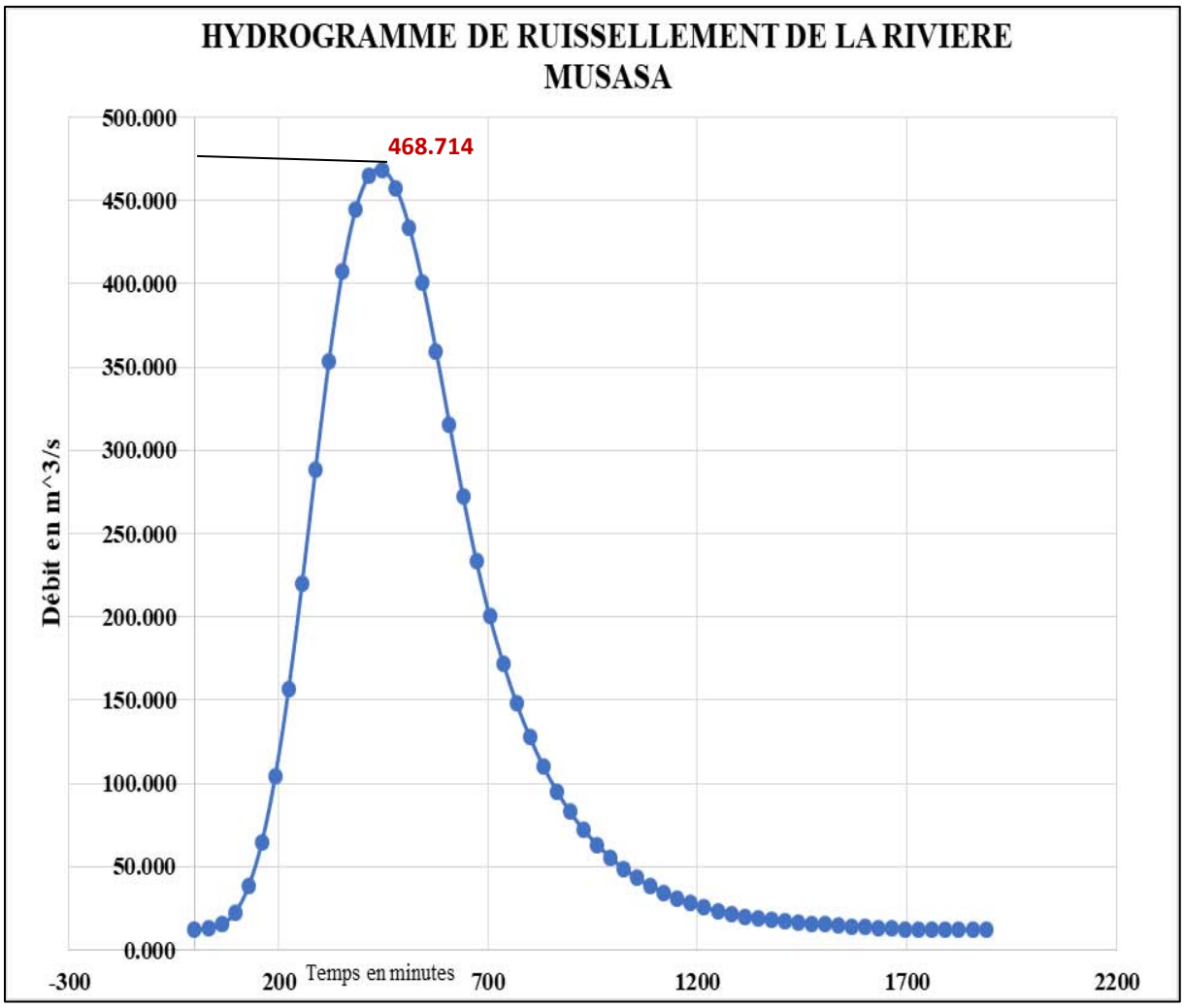


Figure III. 13 : Hydrogramme de ruissellement de la rivière MUSASA

CHAPITRE IV : MODELE DE GESTION DES RESSOURCES D'EAU

Dans ce chapitre, nous allons préciser la gestion des ressources d'eau et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en assurant que les infrastructures ne sont pas inondées et l'irrigation se fait adéquatement.

IV.1. Cadre hydraulique de la zone d'étude

Le marais faisant objet de notre étude est traversé par la rivière MUSASA causant mal des dégâts tout au long de son parcours comme l'érosion de ses berges. Quelques photos prises sur ce cours illustre l'ampleur du problème.



Figure IV. 1: Inondation de marais MUSASA

IV.2. Zone d'étude

Le Burundi est un pays dont la principale activité économique est l'agriculture. De ce fait on trouve pas mal d'une étendue irriguée dans la plaine du MOSO sous le nom Sud-MUSASA. Pendant la saison de pluies la rivière MUSASA inondé un marais non cultivé d'une étendue environ 88,993165ha, ce qui rend impossible son exploitation. Ces eaux y stagnent jusqu'au mois de mi-juin quelques fois d'où abandon de l'exploitation du marais. Dans ce périmètre, la culture la plus pratiquée est le riz et en le cultivant en deux saisons.

IV.3. Délimitation du Marais de MUSASA

La délimitation du Marais MUSASA 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 : Carte de localisation du Marais MUSASA, sa carte topographique et sa carte de surface du Marais MUSASA.

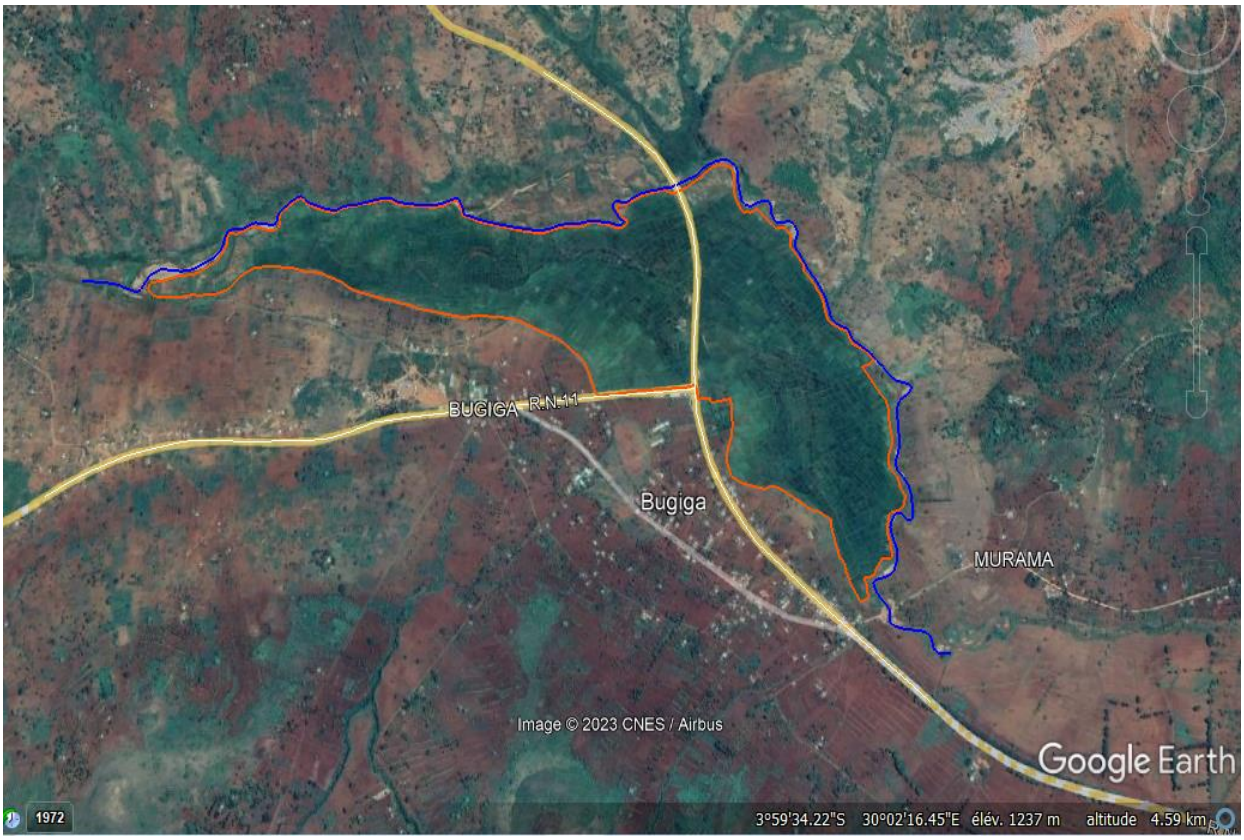


Figure IV. 2: Localisation de la zone d'étude

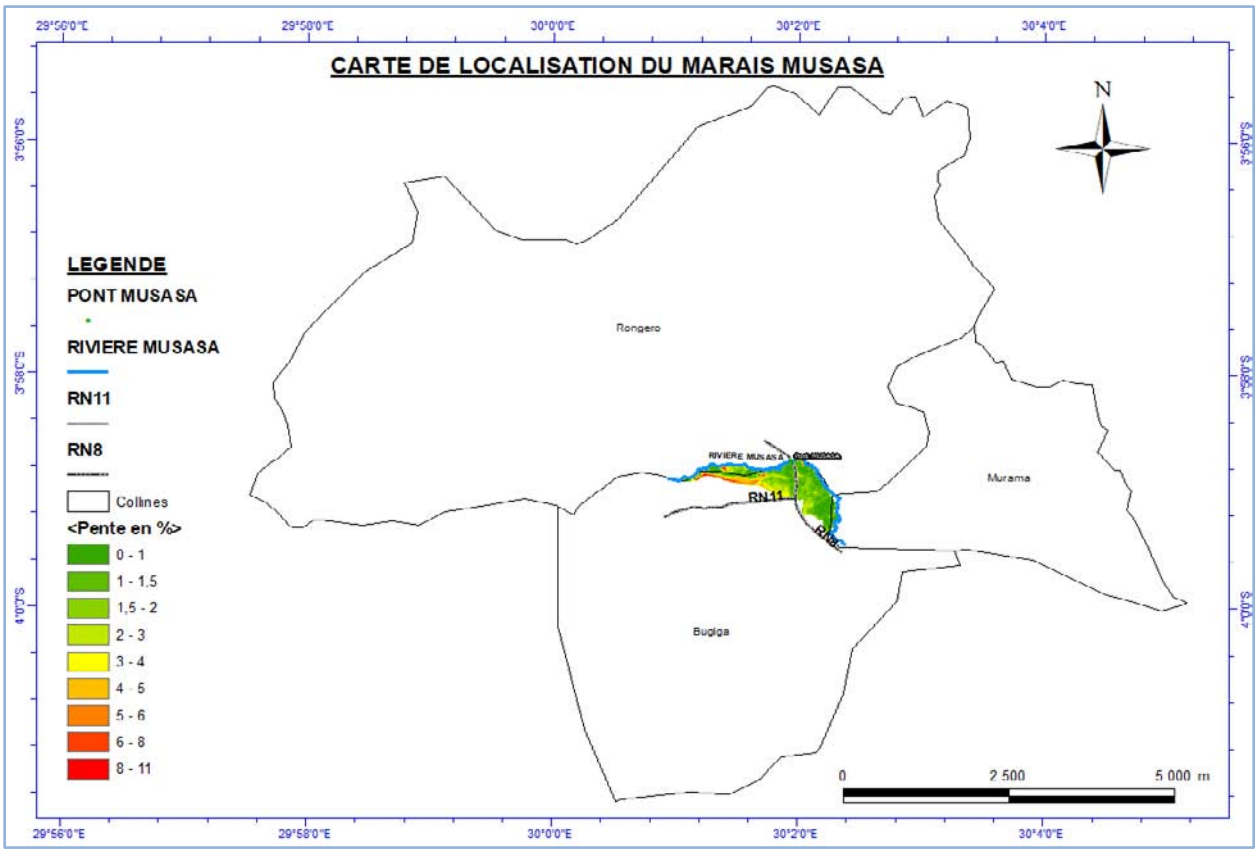


Figure IV. 3 : Carte de localisation du marais MUSASA

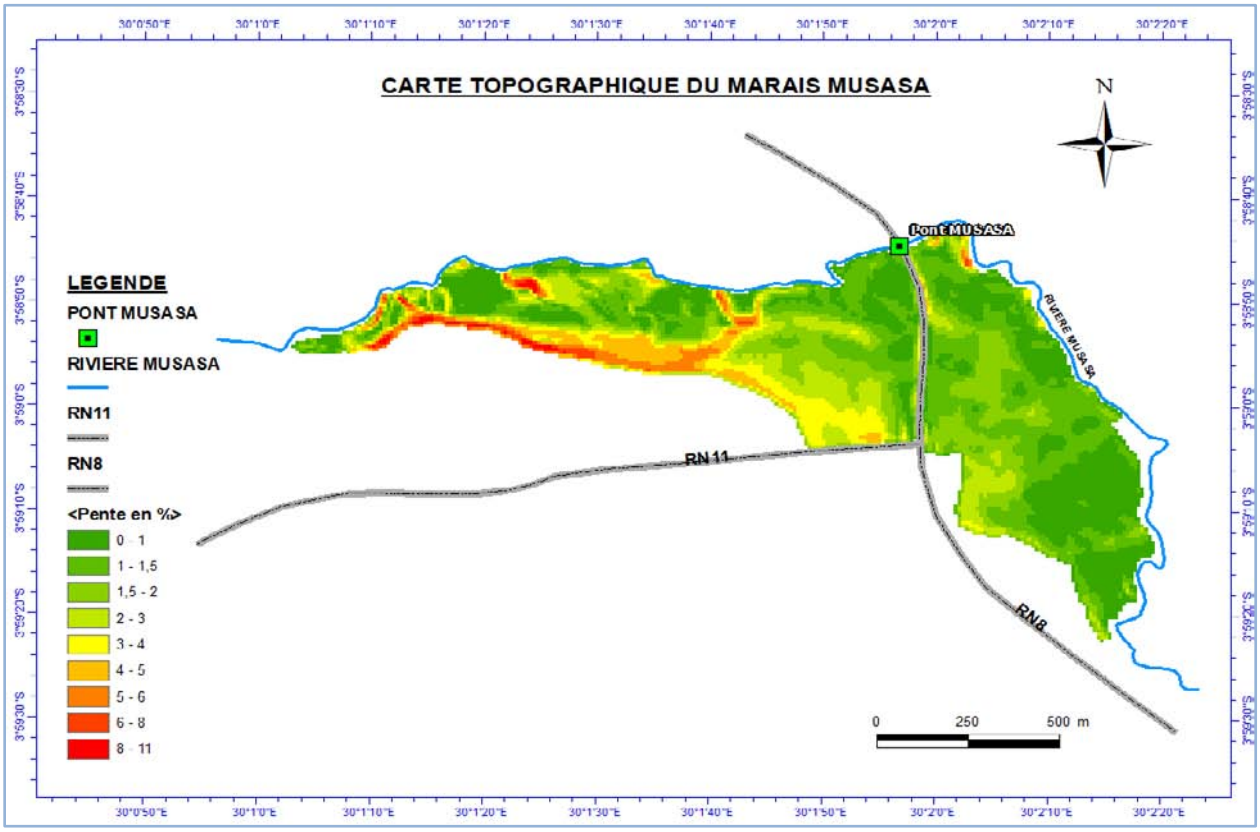


Figure IV. 4 : Carte topographique du marais MUSASA

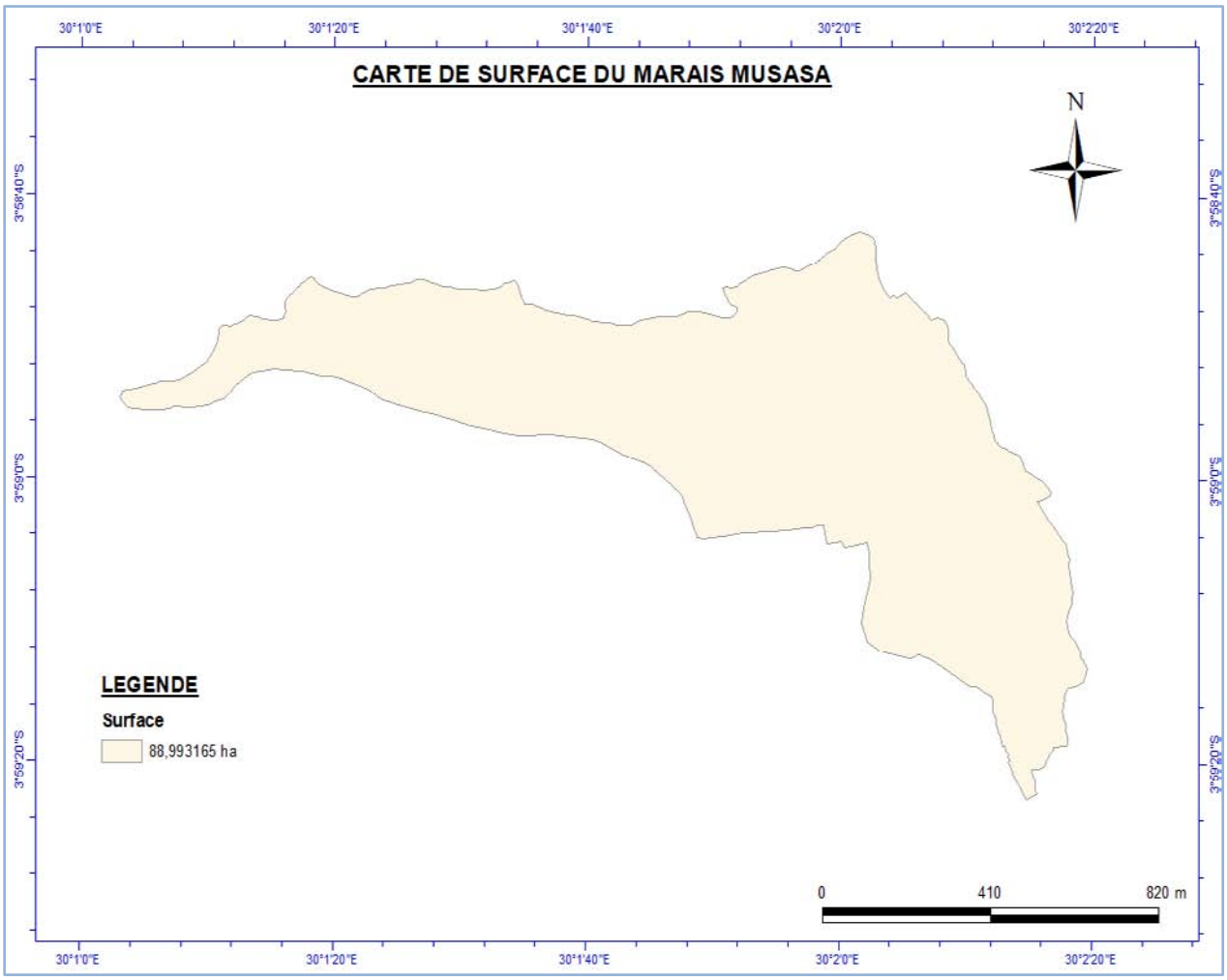


Figure IV. 5: Carte de surface du Marais MUSASA

IV.4. Réseau hydrographique

L'agriculture sans apport d'eau autre que celui des précipitations, dite agriculture " sous pluie ", est très contraignante, car :

- ✓ La répartition des précipitations, dans l'espace et dans le temps n'est pas uniforme, surtout dans les régions ayant des régimes de pluie très contrastés.
- ✓ Cette agriculture limite le choix des cultures car dans une région bien déterminée, seules les cultures adaptées à la répartition annuelle des pluies peuvent être cultivées.
- ✓ Elle contraint les agriculteurs à s'adapter aux aléas climatiques pouvant ruiner les récoltes d'une l'année.
- ✓ Elle est impossible dans les régions arides.

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

Pour arriver à notre objectif global cité précédemment, nous avons procédé comme suit :

a) Etude hydrologique

Le but principal de l'étude hydrologique est la détermination du débit des crues (débits de pointes) pour une période de retour donné et les débits garantis en année sèche, en année moyenne, en année humide de l'émissaire.

Débits des crues : débit maximal de l'émissaire qui peut être observé une fois au cours d'une période donnée (pour notre cas, nous avons pris une période de 100ans)

- ✓ Année sèche : l'année dont le débit est garantie à 80%
- ✓ Année moyenne : l'année dont le débit est garantie à 50%
- ✓ Année humide **:** l'année dont le débit est garantie à 20%

b) Bilan hydrique

On fait la comparaison des débits de l'émissaire : ressources en eau et les besoins en eau d'irrigation). Ce bilan nous permet de constater là où il y a les déficits d'eau quel que soit en année sèche, en année moyen et en année humide.).

Pour faire ce travail, nous avons fait le traitement des données en Excel (données hydrologiques mensuels de 30 ans [1991-2021] et données climatologiques journalières de 21 ans [2001-2021] pour trouver les données des années fictives (année sèche, année moyenne et année humide).

Avec les données hydrologiques, on trouve les débits mensuels de l'émissaire et avec les données climatologiques on trouve les précipitations décadaires, les températures moyennes décadaires et les températures minimales décadaires. Ces données décadaires sont encore traitées dans le logiciel Aquacrop pour le calcul des besoins nets d'irrigation.

Ensuite nous avons fait le bilan hydrique ce qui nous permet de faire la comparaison à celle des débits de pointe.

IV.5. Traitement des données et analyses des résultats

IV.5.1. Analyse hydro agricole

D'après les données de la figure IV.5 traite à l'aide de l'Arc gis 10.3, on déduit le périmètre à irriguer pour ce marais. La superficie totale à irriguer pour notre zone d'étude est de 88,993165ha. Il faut donc évaluer les besoins en eau d'irrigation de ce périmètre afin de proposer une solution.

IV.5.2. Gestion des ressources en eaux

La gestion 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).

IV.5.3.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).

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).

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 maraicheres et de cafe a l'imbo-nord: 1 300 ha;
- ✓ Riziculture dans la plaine de l'imbo-centre: 4 050 ha;
- ✓ Riziculture au moso: 160 ha;
- ✓ Canne a sucre au moso (sosumo): 1 450 ha;
- ✓ Riziculture d'altitude: 14 470 ha. (fao, 2005).

IV.5.4. Calcul des besoins en eau

Les besoins en eau sont estimés selon la méthode FAO qui consiste principalement à confronter la pluviomètrie à l'évapotranspiration des cultures.

Les besoins en eau, dont les débits d'équipements des réseaux constituent l'expression ultime ; sont la résultante, des spéculations et cycles culturaux choisis, des besoins de la plante dans le cadre du climat de la zone du projet, et aussi à la fois des heures d'irrigation retenues dans les divers étapes du processus d'irrigation soit :

- L'efficience à la parcelle ;
- L'efficience des tertiaires ;
- L'efficience des secondaires et enfin ;
- L'efficience des primaires.

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 ou du barrage de dérivation.

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).

$$I = Pu = ETc + D \pm \Delta S \qquad \text{(IV.1)}$$

D'où *:*

$$I = ETc - Pu \pm \Delta S \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec :

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 :

$$I = ETc - Pu \qquad \text{(IV.3)}$$

D'où :

$$I = Kc\ x\ ETo - Pu \qquad \text{(IV.4)}$$

$$Bnets = Kc\ x\ ETo - Pu \qquad \text{(IV.5)}$$

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

$$B_{bruts} = \frac{Kc*ETo-Pu}{E_G} \quad \text{(IV.6)}$$

$$E_G = Ep * Er \quad \text{(IV.7)}$$

Où

E_p : efficience parcelle ;

E_G : efficience globale ;

E_r : 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.

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.

IV.5.5. La méthode moderne Aquacrop

L'Aquacrop est un modèle de simulation de croissance des cultures développé par la FAO pour répondre aux problèmes de sécurité alimentaire et évaluer l'effet de l'environnement et de la production agricole (www.fao.org>aquacrop).

Il calcule les besoins en eau d'irrigation en fonction des données d'entrée qui sont essentiellement les suivantes :

- Le climat ;
- La Culture ;
- La gestion (irrigation et le champ) ;
- Le Sol (profil & aquifère).

Avec ce logiciel tous les paramètres sont tenus compte.

Les figures suivantes montrent les menus principaux du logiciel Aquacrop

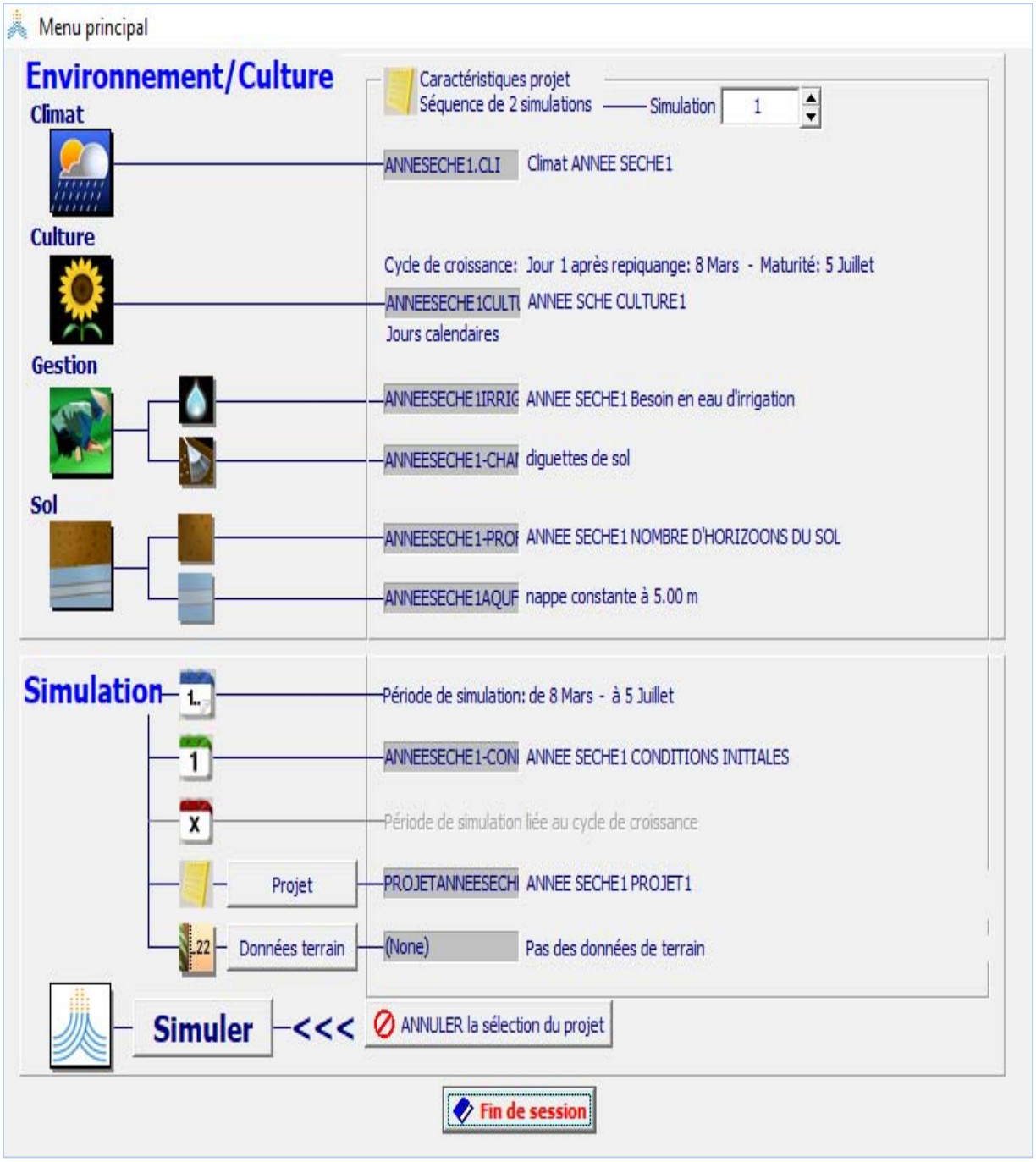


Figure IV. 6: Menu principale du logiciel Aquacrop

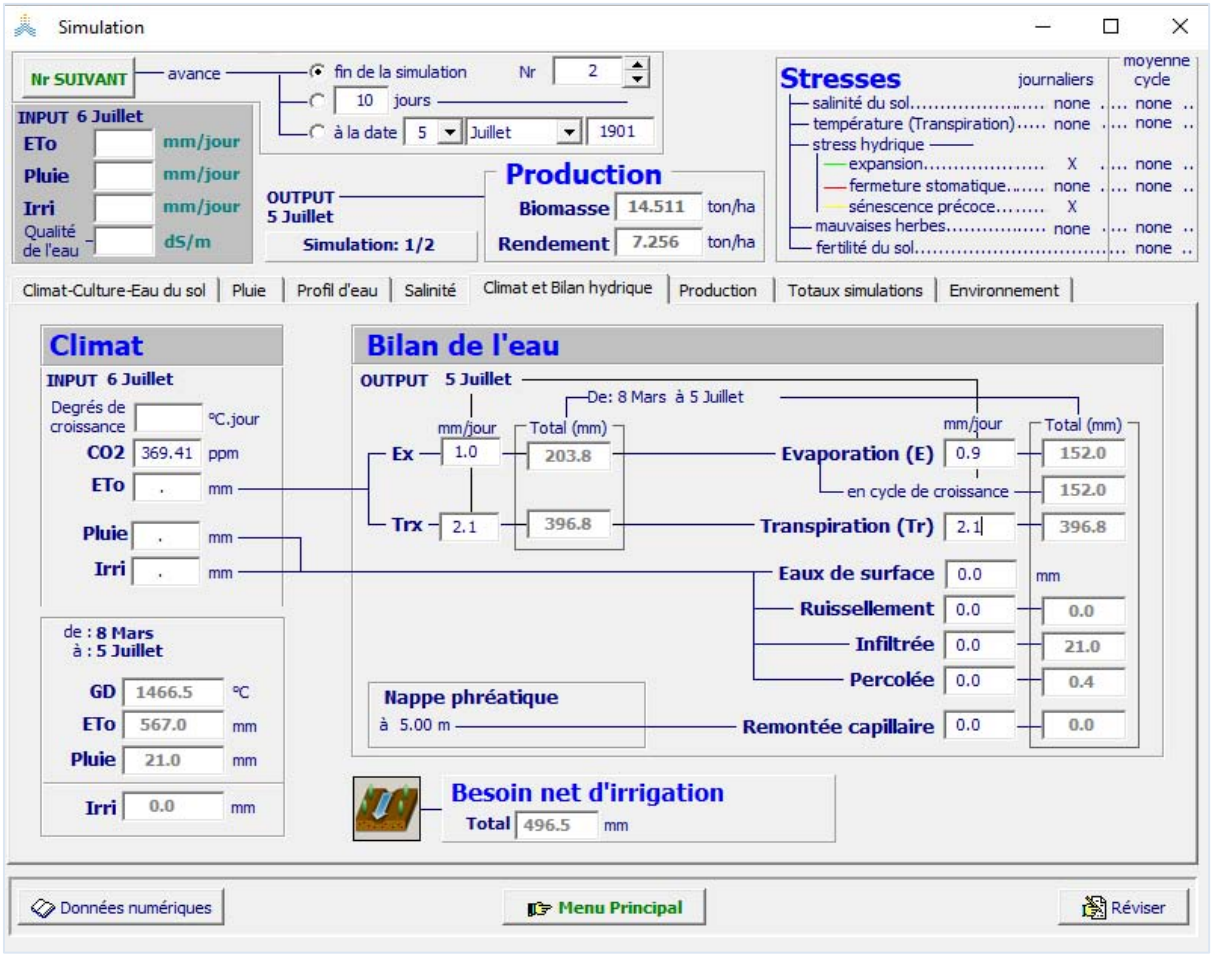


Figure IV. 7 : Menu principale du résultat de simulation

IV.6. Bilan hydrique de la rivière MUSASA

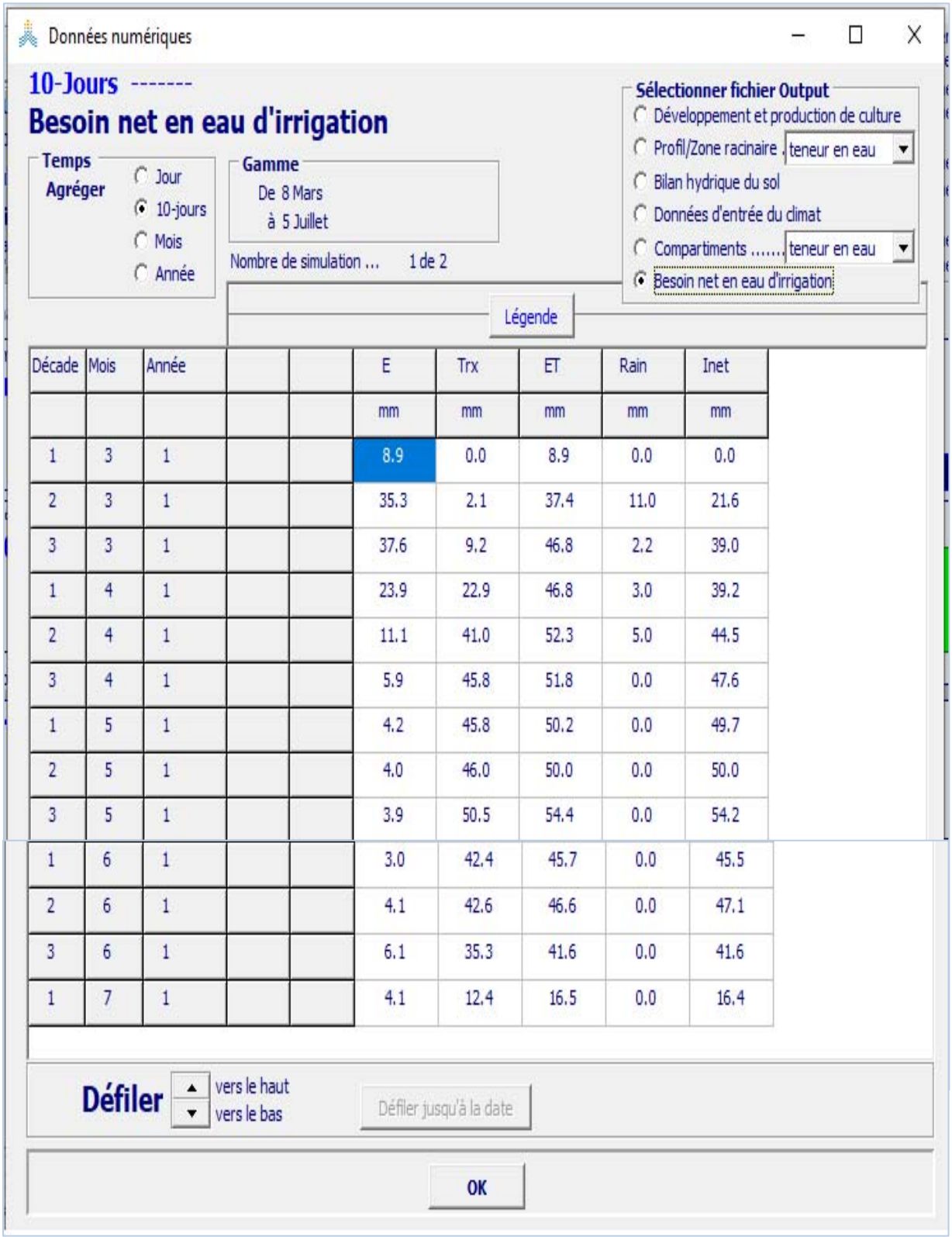
IV.6.1. Evaluation comparative des méthodes de calcul des besoins en eau d'irrigation

Dans le calcul des besoins, plusieurs logiciels sont proposés. Il s'agit entre autre le Cropwater et Aquacrop. La méthode préférée parmi les deux méthodes est celle de l'Aquacrop que nous allons développer ci-dessous pour sa simplicité.

L'Aquacrop est la version moderne de calcul des besoins en eau des cultures et d'irrigation. Sa dernière version a été développée 2018 et c'est celle qui a été utilisée dans ce travail. Néanmoins, des calculs numériques qui ne tiennent pas compte des caractéristiques pédologiques s'utilise surtout au Burundi, en absence des données des caractéristiques du sol.

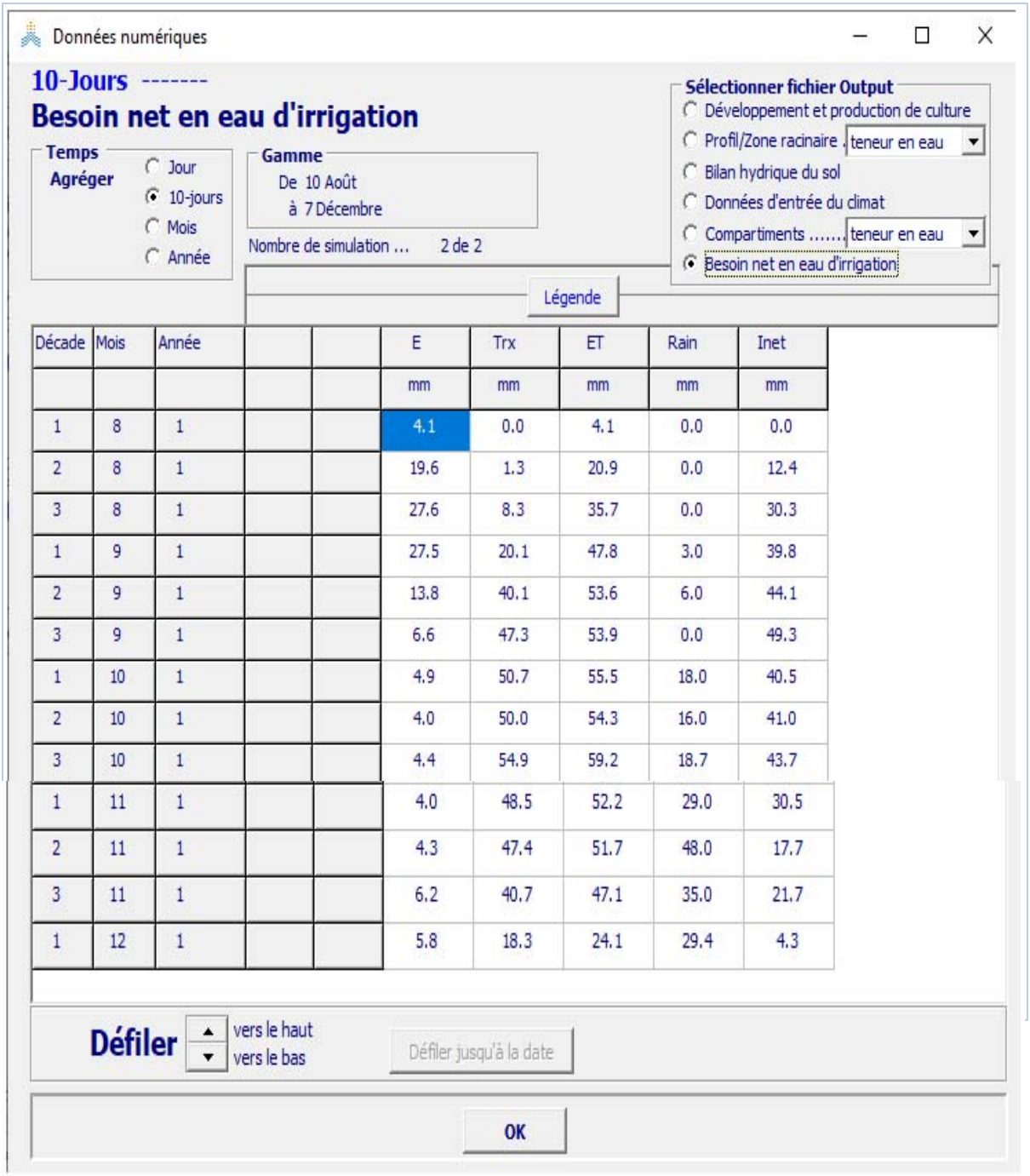
Le riz cultivé a une période de 4mois, Pour 2 saisons, la première saison commence en mi-Mars pour se terminer en début -Juillet et la deuxième saison commence en mi-Août pour se terminé en début -Décembre Septembre.

Les figures suivantes (IV.6 et IV.7) montrent les résultats des besoins en eau d'irrigation donnés par le logiciel Aquacrop pour deux calendriers retenus (riz-riz).



Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
1	3	1			8.9	0.0	8.9	0.0	0.0
2	3	1			35.3	2.1	37.4	11.0	21.6
3	3	1			37.6	9.2	46.8	2.2	39.0
1	4	1			23.9	22.9	46.8	3.0	39.2
2	4	1			11.1	41.0	52.3	5.0	44.5
3	4	1			5.9	45.8	51.8	0.0	47.6
1	5	1			4.2	45.8	50.2	0.0	49.7
2	5	1			4.0	46.0	50.0	0.0	50.0
3	5	1			3.9	50.5	54.4	0.0	54.2
1	6	1			3.0	42.4	45.7	0.0	45.5
2	6	1			4.1	42.6	46.6	0.0	47.1
3	6	1			6.1	35.3	41.6	0.0	41.6
1	7	1			4.1	12.4	16.5	0.0	16.4

Figure IV. 8: Besoin net selon le calendrier du terrain [Riz-Riz] mi-Mars -fin début Juillet



Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
1	8	1			4.1	0.0	4.1	0.0	0.0
2	8	1			19.6	1.3	20.9	0.0	12.4
3	8	1			27.6	8.3	35.7	0.0	30.3
1	9	1			27.5	20.1	47.8	3.0	39.8
2	9	1			13.8	40.1	53.6	6.0	44.1
3	9	1			6.6	47.3	53.9	0.0	49.3
1	10	1			4.9	50.7	55.5	18.0	40.5
2	10	1			4.0	50.0	54.3	16.0	41.0
3	10	1			4.4	54.9	59.2	18.7	43.7
1	11	1			4.0	48.5	52.2	29.0	30.5
2	11	1			4.3	47.4	51.7	48.0	17.7
3	11	1			6.2	40.7	47.1	35.0	21.7
1	12	1			5.8	18.3	24.1	29.4	4.3

Figure IV. 9 : Besoin net selon le calendrier du terrain [Riz-Riz] Début Août -Fin Décembre

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 IV.1 et IV.2 donnent les résultats des débits de projets mensuels trouvés.

IV.6.2. Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures

Tableau IV. 1: Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures

					Débit projet décadaires (m^3/s)	Débit projet mensuel (m^3/s)
Mois	Décades	Besoins nets BN (mm)	Besoins bruts BB (mm)	Débit projet (l/s.ha)	MUSASA (88,993165ha)	
	I	0.00	0.00	0.00	0.00	
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	
Janvier	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	I	0.00	0.00	0.00	0.00	
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	
Février	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	I	0.00	0.00	0.00	0.00	
	II	21.60	36.00	1.25	0.11	
Mars	III	39.00	65.00	2.26	0.20	0.20
	I	39.20	65.33	2.27	0.20	
	II	44.50	74.17	2.58	0.23	
Avril	III	47.60	79.33	2.75	0.25	0.25
	I	49.70	82.83	2.88	0.26	
	II	50.00	83.33	2.89	0.26	
Mai	III	54.20	90.33	3.14	0.28	0.28
	I	45.50	75.83	2.63	0.23	
	II	47.10	78.50	2.73	0.24	
Juin	III	41.60	69.33	2.41	0.21	0.24
	I	16.40	27.33	0.95	0.08	
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	
Juillet	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
	I	0.00	0.00	0.00	0.00	
	II	12.40	20.67	0.72	0.06	
Août	III	30.30	50.50	1.75	0.16	0.16
	I	39.80	66.33	2.30	0.20	
	II	44.10	73.50	2.55	0.23	
Septembre	III	49.30	82.17	2.85	0.25	0.25
	I	40.50	67.50	2.34	0.21	
	II	41.00	68.33	2.37	0.21	
Octobre	III	43.70	72.83	2.53	0.23	0.23
	I	30.50	50.83	1.77	0.16	
	II	17.70	29.50	1.02	0.09	
Novembre	III	21.70	36.17	1.26	0.11	0.16
	I	4.30	7.17	0.25	0.02	
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	
Décembre	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02

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

Bilan hydrique consiste à établir l'équation Ressources – Besoins en comparant les ressources en eau de l'émissaire et les besoins en eau du périmètre à irriguer.

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 répond au besoin en eau de la culture qui est variable en fonction de son stade de développement.

Le bilan hydrique a été calculé en utilisant la formule suivante :

$$Bilan = Q\acute{e}missaire - Qutile \qquad \text{(IV.8)}$$

Avec :

Q : le débit

Le bilan hydrique est réalisé pour chaque type d'année : l'année sèche, l'année moyenne et l'année humide.

Les données de la rivière pour chaque année ont été déterminées en utilisant les données provenant du jaugeage de 30ans de 1992 à 2021 avec une probabilité de non dépassement

$$P = \frac{m-0.5}{n+1} * 100\% \qquad \text{(IV.9)}$$

Avec :

m : le numéro d'ordre ;

n : taille de l'échantillon.

Ainsi le tableau suivant traite les débits des crues, d'étiages et de retour de la rivière MUSASA.

IV.6.3. Débit maximum annuel de la rivière MUSASA

Tableau IV. 2: Débits de la rivière MUSASA

N°	Mois	Débit max	Débit max crois	F(x)	U(x)
1	1992	8.32	3.70	0.01	-1.40
2	1993	7.24	3.95	0.05	-1.09
3	1994	6.65	4.22	0.08	-0.91
4	1995	11.39	4.32	0.11	-0.76
5	1996	8.24	5.62	0.15	-0.64
6	1997	11.81	5.64	0.18	-0.52
7	1998	14.34	6.07	0.21	-0.42
8	1999	7.78	6.16	0.25	-0.32
9	2000	6.36	6.36	0.28	-0.23
10	2001	9.75	6.58	0.31	-0.13
11	2002	10.87	6.65	0.35	-0.04
12	2003	5.62	6.88	0.38	0.04
13	2004	9.46	7.24	0.41	0.13
14	2005	4.32	7.55	0.45	0.22
15	2006	15.08	7.78	0.48	0.31
16	2007	15.81	8.24	0.51	0.41
17	2008	5.64	8.32	0.55	0.51
18	2009	6.07	8.32	0.58	0.61
19	2010	6.16	8.47	0.61	0.72
20	2011	6.88	9.46	0.65	0.84
21	2012	3.70	9.75	0.68	0.96
22	2013	13.10	10.87	0.71	1.09
23	2014	20.06	11.39	0.75	1.24
24	2015	4.22	11.81	0.78	1.40
25	2016	6.58	11.81	0.81	1.59
26	2017	11.81	13.10	0.85	1.81
27	2018	7.55	14.34	0.88	2.08
28	2019	3.95	15.08	0.91	2.44
29	2020	8.47	15.81	0.95	2.97
30	2021	8.32	20.06	0.98	4.08

IV.6.4 : Débit de la rivière MUSASA pour une période de retour

Tableau IV. 3: Débit de la rivière MUSASA pour une période de retour

Débit pour une période de retour 100 ans			
		a	3.10
		b	7.08
Période de retour (T)	F(x)	u(x)	Q (m3/s)
5	0.80	1.50	11.75
10	0.90	2.25	14.08
15	0.93	2.67	15.39
20	0.95	2.97	16.31
25	0.96	3.20	17.02
30	0.97	3.38	17.60
35	0.97	3.54	18.09
40	0.98	3.68	18.51
45	0.98	3.80	18.88
50	0.98	3.90	19.21
55	0.98	4.00	19.51
60	0.98	4.09	19.78
65	0.98	4.17	20.03
70	0.99	4.24	20.26
75	0.99	4.31	20.48
80	0.99	4.38	20.68
85	0.99	4.44	20.87
90	0.99	4.49	21.05
95	0.99	4.55	21.22
100	0.99	4.60	21.38

Les tableaux suivants montrent les résultats des bilans hydriques de la rivière MUSASA en fonction des années pour rotation de deux cultures (Riz-Riz).

IV.6.5. Bilan hydrique année humide avec rotation des cultures

Tableau IV. 4: Bilan hydrique année humide avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	RESSOURCE	BESOINS	Bilan	surplus ou déficit (m^3)
Janvier	4.12	0.00	4.12	118656.0
Février	3.31	0.00	3.31	95443.2
Mars	5.33	0.00	5.33	153504.0
Avril	7.91	0.00	7.91	227808.0
Mai	4.96	0.14	4.82	138947.1
Juin	3.58	0.24	3.34	96118.0
Juillet	3.25	0.08	3.17	91404.8
Août	3.17	0.03	3.14	90391.2
Septembre	3.10	0.02	3.08	88642.2
Octobre	4.36	0.00	4.36	125539.2
Novembre	5.11	0.00	5.11	147168.0
Décembre	5.33	0.00	5.33	153504.0

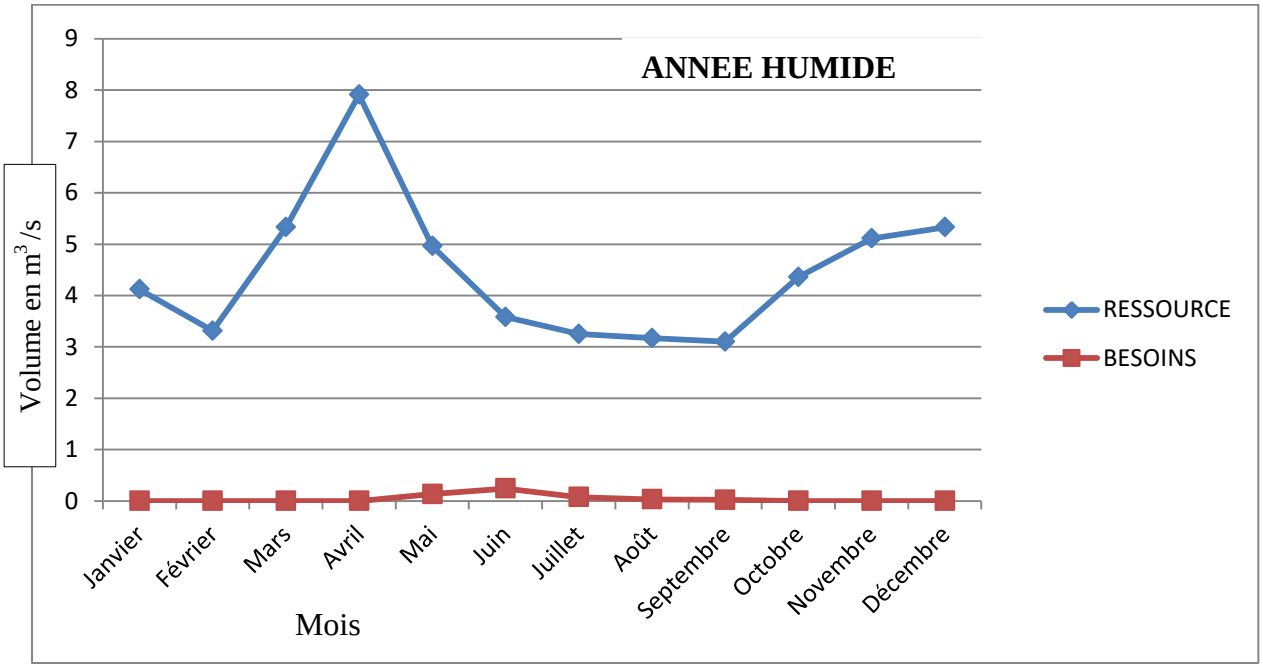


Figure IV. 10: Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année humide avec rotation des cultures (riz-riz)

IV.6.6. Bilan hydrique année moyenne avec rotation des cultures

Tableau IV. 5: Bilan hydrique année moyenne avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	RESSOURCE	BESOINS	Bilan	surplus ou déficit (m^3)
Janvier	4.09	0.00	4.09	117849.60
Février	4.36	0.00	4.36	125539.20
Mars	3.82	0.01	3.81	109852.85
Avril	6.82	0.17	6.65	191417.55
Mai	4.21	0.28	3.93	113064.95
Juin	3.51	0.24	3.27	94087.20
Juillet	2.98	0.08	2.90	83376.69
Août	3.75	0.22	3.53	101562.83
Septembre	5.76	0.15	5.61	161498.53
Octobre	3.87	0.11	3.76	108353.48
Novembre	3.63	0.07	3.56	102541.65
Décembre	3.37	0.00	3.37	97142.40

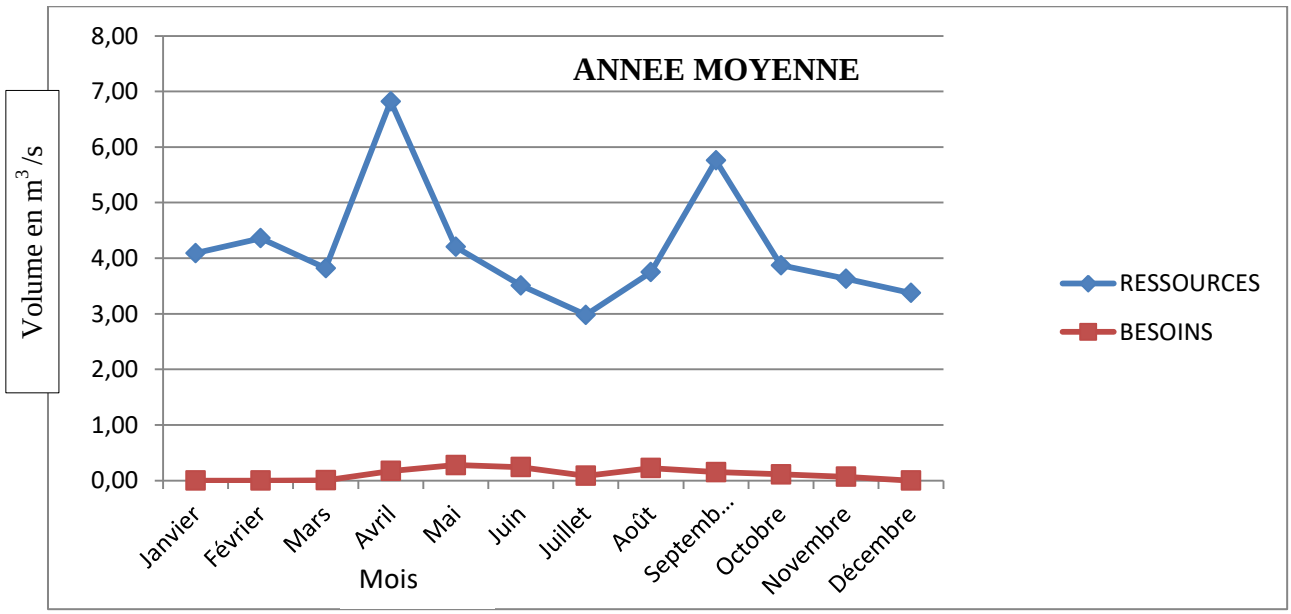


Figure IV. 11 : Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année moyenne avec rotation des cultures (riz-riz)

IV.6.7. Bilan hydrique année sèche avec rotation des cultures

Tableau IV. 6: Bilan hydrique année sèche avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	RESSOURCE	BESOINS	Bilan	surplus ou déficit (m^3)
Janvier	1.88	0.00	1.88	54172.80
Février	2.62	0.00	2.62	75456.00
Mars	4.56	0.20	4.36	125543.44
Avril	7.30	0.25	7.05	203179.88
Mai	226	0.28	1.98	56904.95
Juin	3.89	0.24	3.65	105046.04
Juillet	3.16	0.08	3.07	88517.92
Août	2.91	0.16	2.75	79313.85
Septembre	3.36	0.25	3.11	89513.33
Octobre	3.51	0.23	3.29	94635.13
Novembre	2.25	0.16	2.09	60333.78
Décembre	2.50	0.02	2.48	71391.02

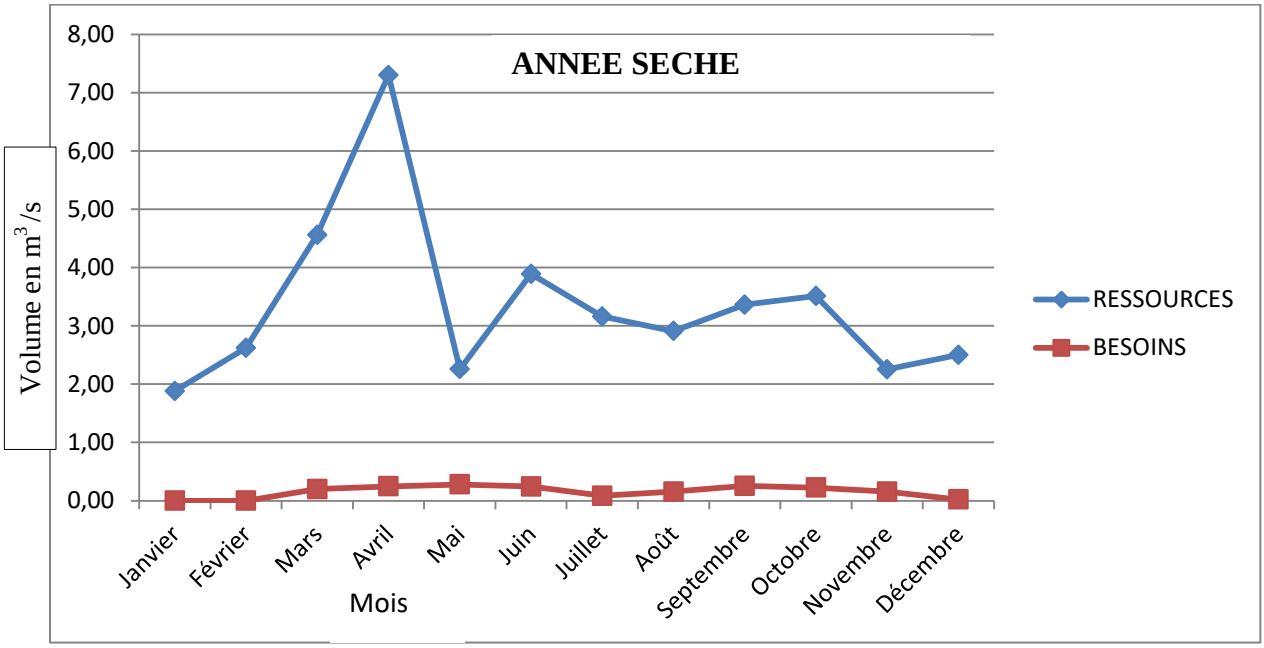


Figure IV. 12: Bilan hydrique de la rivière MUSASA en année sèche avec rotation des cultures (riz-riz)

Conclusion : Après l'évaluation du bilan hydrique de la rivière MUSASA pour deux cultures (riz-riz), les résultats montrent que les ressources ou apports sont en quantité suffisante par rapport aux besoins pour la rivière MUSASA.

IV.7. Analyse des résultats

Les données de l'IGEBU, influent sur la hauteur maximum de la rivière qui est 4.05m. Les levées topographiques montrent que la largeur de la rivière est de 13,5 m ce qui nous donne une section de 74.93m^2 (4.05m*13,5m).

IV.8. Détermination de la hauteur des digues et dimensionnement hydrauliques

IV.8.1. Calcul de la hauteur des digues

Hauteur selon la vitesse considérée de 3m/s et 1,5m/s selon la littérature de la vitesse de rivière usuelle considérée.

L'hydrogramme par la méthode de SCS-CN nous a donné pour une période de 50 ans le pic de 468,71 m^3/s. Avec variation de la vitesse de 1,5m/s jusqu'à 3m/s selon la littérature, on trouve une section nécessaire qui varie de 156,24 m^2 à 312,47 m^2 (S=Q/V), ce qui signifie que la section qu'on se donne à ajouter sur la rivière MUSASA pour contenir ces eaux de pics varie de 312,47m^2 (-) 74.93m^2 ce qui donne une superficie de 237.54 m^2. Avec une largeur de l'emprise des digues qu'on se fixe égale à 45m de chaque côté des berges ; la hauteur des digues varie de 268.24m^2/90 m ce qui vaut 2.64 m qui est la hauteur utile des digues calculées. Ajouté une revanche de 0.15 cm de chaque côté, on trouve une hauteur totale de digue 3 m.

On trouve que cette hauteur n'est pas trop imposante, on ne va pas besoin d'un bassin d'écrêtement. Ainsi, Pour protéger le périmètre contre les crues de 50 ans, il faut construire des digues de 3 m de hauteur. Pour calculer le débit de pointe passant à l'exutoire de périmètre d'irrigation a été utilisée la méthode de SCS-CN la méthode de l'indice w et celle de HUFF a été utilisée pour calculer les intensités suivant la distribution de deuxième quartile selon l'observation du régime de précipitation de la zone d'étude. Avec la digue, on est assuré de pouvoir contenir une crue de 50ans et de protéger le périmètre irrigué ainsi que les infrastructures en place.

Par calcul se basant sur le logiciel de calcul des besoins en eau d'irrigation Aquacrop, donne les besoins maximums de 0,28m^3/s pour toutes les années (Année humide, Année moyenne et Année sèche) en appliquant deux saisons de culture avec la culture du riz.

Ces ressources mensuelles pondérées selon les données de l'IGEBU pour la rivière MUSASA ne tombe jamais en dessous de 1,88m^3/s, ce qui est largement supérieur aux besoins en eau d'irrigation (1,88m^3>0,28m^3/s). Cela nous montre que la dérivation sur la rivière MUSASA

suffise pour l'irrigation du périmètre. Le tableau qui suit montrer quelques paramètres de calcul des dimensions de la digue sur le marais MUSASA:

Désignation	**Valeurs**	**Unité**
Largeur du sommet de la digue (a)	1.5	m
Largeur à la base du noyau de la digue (b)	3.7	m
Longueur de la digue (c)	12.5	m
Largeur de la digue (l)	14.5	m
Hauteur de la digue (H)	3	m
Hauteur du tirant d'eau maximale de la digue (h)	2.5	m
Hauteur d'encrage de la digue (e)	1	m
Distance entre l'extrêmité de la base du noyau et l'extrêmité du sommet du noyau en projection (cote aval) : f	1.2	m
Distance entre l'extrêmité de la base du noyau et l'extrêmité du sommet du noyau en projection (cote amont) : d	1	m

IV.8.2. Vue en plan de la digue sur le marais MUSASA

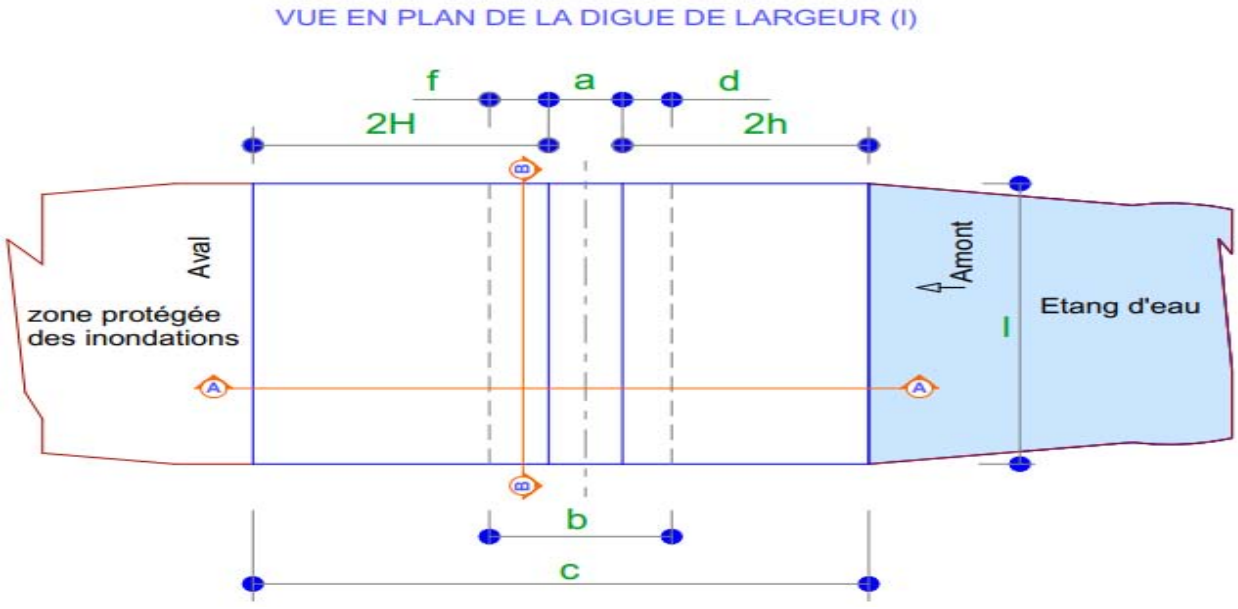


Figure IV.13 : Vue en plan de la digue sur le marais MUSASA

IV.8.3. Coupe A-A et B-B de la digue sur le marais MUSASA

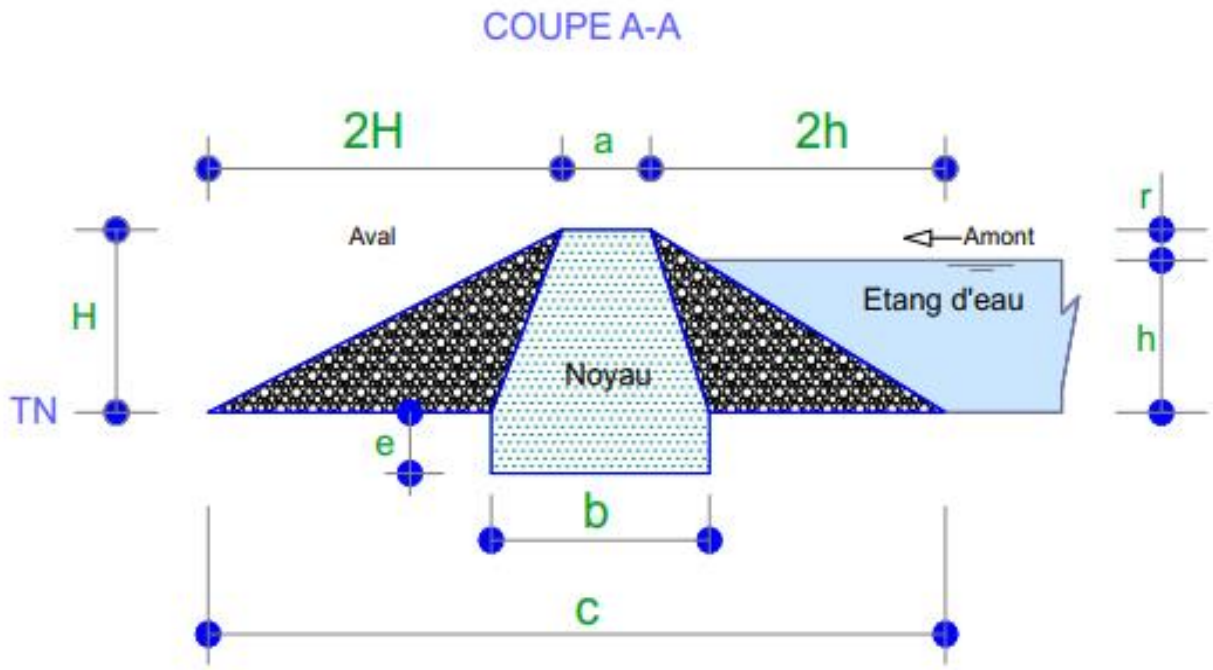


Figure IV.14. Coupe longitudinale de la digue sur le marais MUSASA

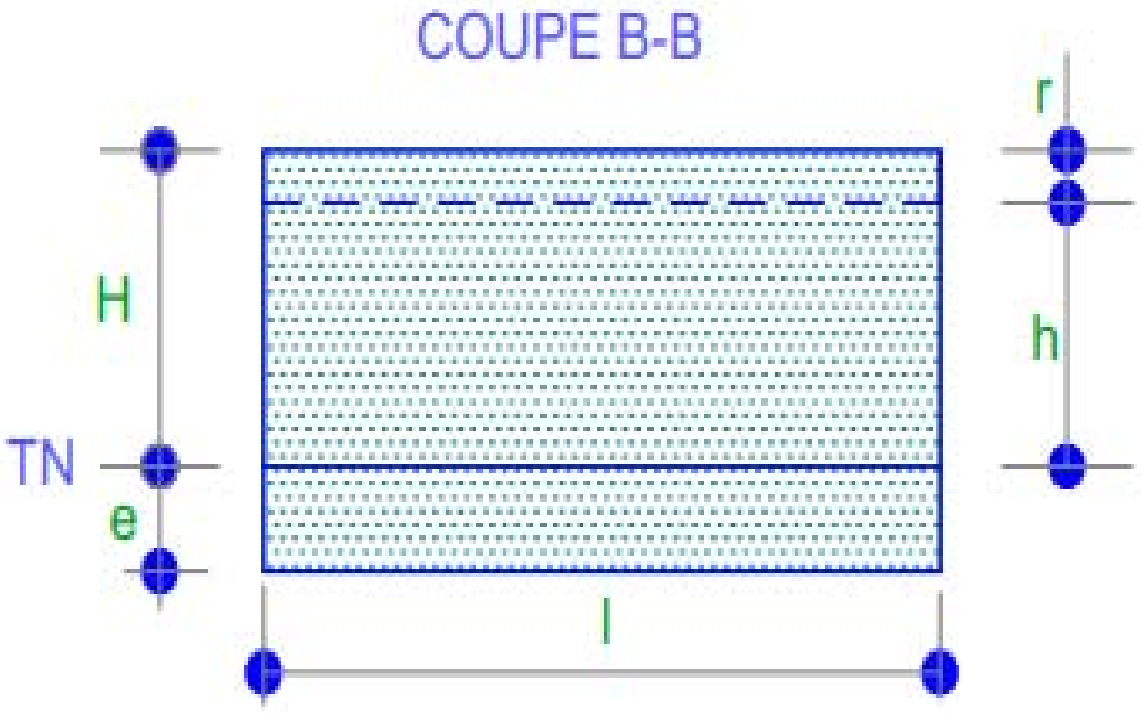


Figure IV.15: Coupe transversale de la digue sur le marais MUSASA

IV.8.4. Dimensionnement hydraulique de l'ouvrage d u dalot

a. Définition de la période de retour correspondant au cas étudiés

Tableau IV. 7: Définition de la période de retour des intensités horaires maximales de précipitation pour différents ouvrages hydrauliques

Type d'ouvrages	Routes Nationales	Routes régionales	Routes locales
Ponts	100ans	100ans	
Dalots	10, 20, 50ans	10, 20, 50ans	10, 20, 50ans
Fossé	5 à 10ans	5 à 10ans	1 à 2ans
Ouvrages de décharges	5 à 10ans	5 à 10ans	1 à 2ans

b. Choix de la valeur du coefficient de ruissellement convenable

Nous nous sommes référés à la méthode proposée par Bernard (1935) qui prend en considération la couverture végétale, la topographie et la texture du sol pour la classification du coefficient de ruissellement.

Le tableau ci-après donne les valeurs usuelles du coefficient de ruissellement :

Tableau IV. 8: Valeurs usuelles des coefficients de ruissellement

Végétation	Topographie	Texture du sol		
		Sable	Argile et limon	Argile
Boisé	Plat (pente de 0 à 5%	0,10	0,30	0,40
	Vallonné (pente de 5 à 10%)	0,25	0,35	0,50
	Montagneux (pente de 10 à 30%)	0,30	0,50	0,60
Déboisé et friches	Plat (pente de 0 à 5%	0,10	0,30	0,60
	Vallonné (pente de 5 à 10%)	0,16	0,36	0,55
	Montagneux (pente de 10 à 30%)	0,22	0,42	0,60
Cultures drainées	Plat (pente de 0 à 5%	0,30	0,50	0,60
	Vallonné (pente de 5 à 10%)	0,40	0,60	0,70
	Montagneux (pente de 10 à 30%)	0,52	0,72	0,82

c. Expressions du débit de saturation des ouvrages

Formule de Manning Strickler :

$$Q_S = S_m \times K_{ST} \times (R_H)^{3/2} \times J^{1/2} \qquad \text{(IV.10)}$$

Avec :

S_m: surface mouillée

K_{ST}: coefficient de Strickler

K_{ST} =70 pour les dalots

K_{ST} =80 pour les buses

K_{ST} =65 pour les fossés maçonnés

R_H: rayon hydraulique (en m)

J: pente moyenne de l'ouvrage

Tableau IV. 9: Récapitulatif des expressions utilisées pour le calcul des différents paramètres hydrauliques

Paramètre	Désignation	Unités	Expression
Largeur du fond	b	m	à calculer
Hauteur de remplissage du dalot	H	m	à calculer
Périmètre mouillée	P_m	m	P_m=b+2H
Surface mouillée	S_m	m²	S_m = b x H
Rayon hydraulique	R_H	m	R_H = Sm/Pm
Coefficient de rugosité	K_{ST}	$m^{1/2}$ /s	K_{ST} = 70 pour un dalot

d. Données de base pour le dimensionnement hydraulique des dalots

Paramètre	Désignation	Unité	Valeur
Débit de projet	Qproj	m^3/s	156.23
Pente de l'ouvrage	J	m/m	0.003
Coefficient de rugosité	n=1/ K_{ST}	-	0.014
Coefficient de Manning	K_{ST}	$m^{1/2}/s$	70

Tableau IV. 10: Calcul de la section hydraulique utile

B(m)	H(m)	S_m (m^2)	P(m)	RH(m)	KST	J	Qs(m^3/s)	V(m/s)
3.60	4	14.56	11.6	1.26	70	0.003	229.18	4.62

e. Synthèse de la section hydraulique retenue pour la construction de l'ouvrage.

Après les calculs, nous proposons un dalot triple type : 3*3.6m*4m dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 11: Caractéristiques de la section hydraulique trouvées

Paramètres	Désignation	Unité	Valeur
Largeur	B	m	3,60
Hauteur	D	m	4.00
Nombre d'alvéoles	N	-	3,00

Conclusion : Le tableau de calcul de la section hydraulique, nous montre qu'une section hydraulique de 3.6m*4m pour chaque alvéole pourra transporter un débit de 229.18m^3/s supérieur au débit du projet qui est 156.23m3/s pour chaque alvéole. $Q_r > Q_p$.

IV.8.5. Vue en plan du dalot MUSASA, Coupe du dalot MUSASA et Coupe des murs en ailes du dalot MUSASA

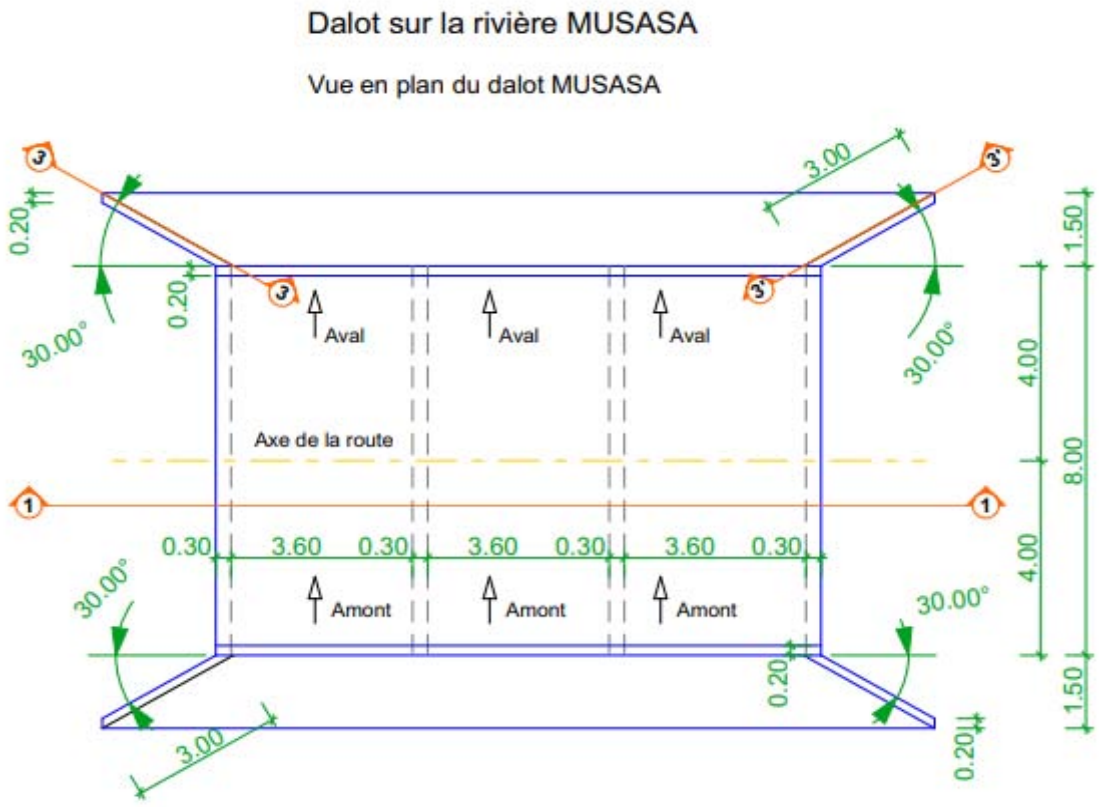


Figure IV.16 : Vue en plan du dalot MUSASA

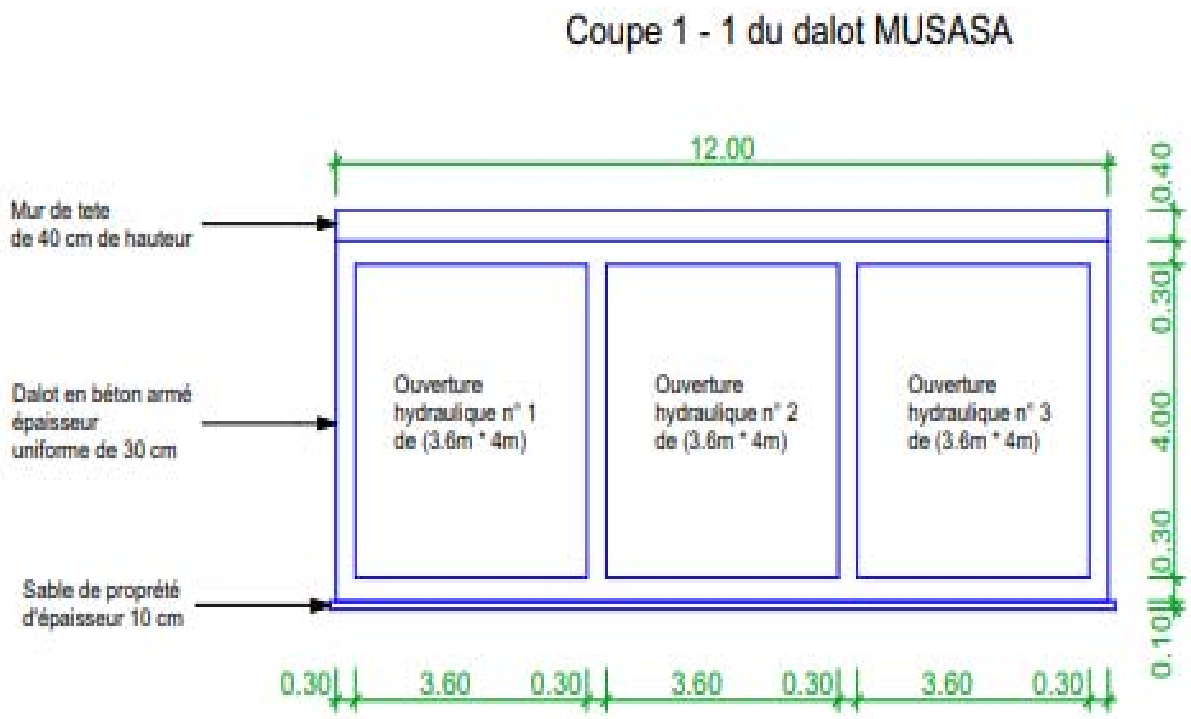


Figure IV.17: Coupe longitudinale du dalot de MUSASA

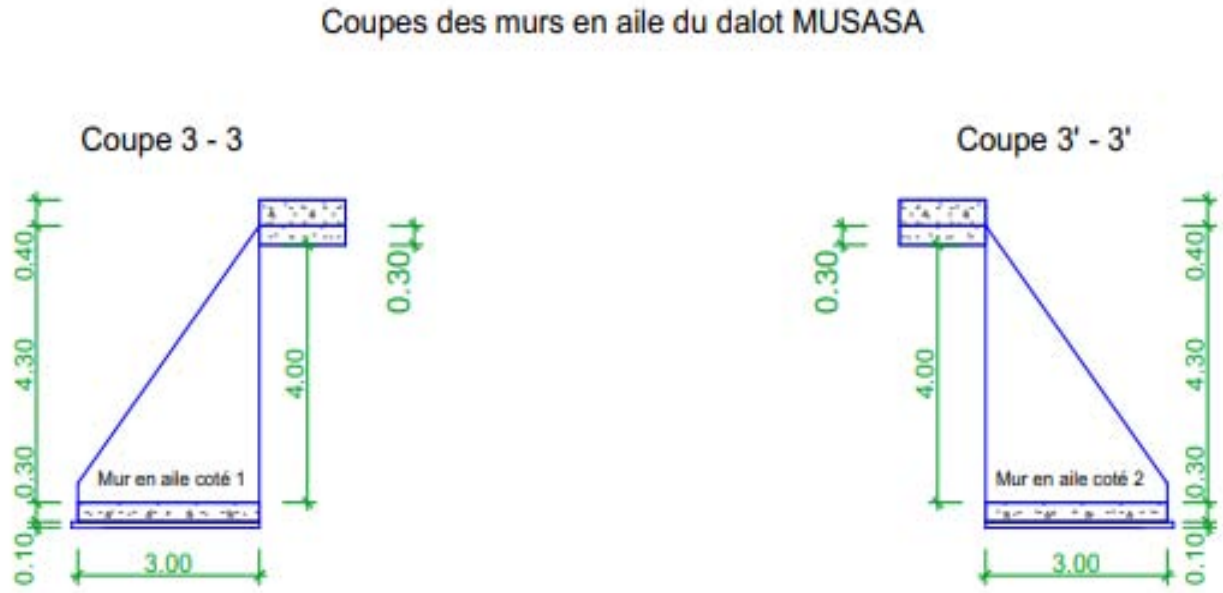


Figure IV.18: Coupe des murs en aile du dalot MUSASA

IV.9. Conclusion Générale et Recommandation

IV.9.1. Conclusion Générale

Au cours de ce travail de fin d'étude de Master intitulé : **« *Aménagement des marais en zone sensible à l'inondation* : *Cas du marais de MUSASA inondé par la rivière MUSASA en République du Burundi* ».**

Etant donné que cette rivière cause beaucoup de dégâts pendant la saison pluvieuse provoquant l'impraticabilité de l'agriculture et la circulation routière, destruction des ménages en aval de la rivière, il s'est avéré nécessaire de répondre à d'innombrables questions que les gens se posent à propos des désordres que l'on observe surtout en saison pluvieuse.

Les études hydrologiques ont été effectuées pour quantifier le débit de pointes préjudiciables pour les ouvrages de franchissement, les humains et l'environnement en général; les méthodes qui ont été utilisées sont celles de l'indice w et Curve Number CN du Soil Conservation Service SCS ; les études hydrauliques en vue de déterminer les caractéristiques géométriques des nouveaux ouvrages ont été aussi réalisées.

Le facteur d'inondation est sans doute le ruissellement de surface, il est clair que les actions d'aménagement et de protection paraissent nécessaires pour anéantir la dynamique d'inondation dans le marais de MUSASA.

A la fin de cette étude des propositions d'aménagement et de protection consistent à construire de digues de 3m de hauteur, réaménagement du marais de MUSASA en utilisant le dalot de 4m de hauteur au lieu des buses et de construire un barrage dérivation 467.714m^3/s pour accumuler les eaux abondantes qui viennent dans ces affluents de la MUSASA pendant la saison pluvieuse afin de l'utiliser en cultivant deux saisons des cultures par l'année. Aussi quelques-unes des solutions proposées pour pallier au problème d'inondation de ce marais. Ainsi dans le maintien du bon fonctionnement des ouvrages, le curage périodique de la retenue est aussi recommandé entre 2 et 3 ans.

Ce travail pourra servir d'exemple aux autres études des bassins versants en vue de permettre un aménagement adéquat d'autres marais ayant le même problème que celui précédemment observé.

IV.9. 2. Recommandation

A L'ETAT

- Promouvoir et intensifier le reboisement des pentes et lutter contre le déboisement.
- Mise en place des infrastructures de protection le long du périmètre de 3m de hauteur des digues et 3m de hauteur pour le dalot.
- Aménagement de la dérivation sur la MUSASA et mise en place d'un réseau d'irrigation (canal d'irrigation, drainage, etc.,..).

A L'IGEBU

- Réhabiliter les stations hydrologiques dans tout le pays.
- Améliorer les techniques de saisie et de conservation des données afin de permettre aux demandeurs un accès rapide et efficace à la base des données hydrologiques.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

I. OUVRAGES GENERAUX

1. hydrogramme synthétique résultant de la superposition des hydro grammes dus aux averses unitaires (Laborde, Décembre 2009).visité le 15/01/2023 ;
2. ARMANDO Lencastre ; Hydraulique générale ; Eyrolles , Paris 1996.
3. MPAWENAYO, Régis, Régulation et stabilisation des cours d'eau torrentiels de la ville de Bujumbura : cas du ruisseau Gishora, octobre 2008.
4. 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.
5. Ahmed Skhiri. Les bases de l'irrigation (Calcul des besoins en eau).
6. FAO. 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres-Enquête AQUASTAT. Rome, 2005.
7. 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.
8. NSENGIYUMVA A. (2014), « Gestion du risque d'inondation et aménagement d'un cours d'eau torrentielle : cas de la rivière Mutimbuzi », Université de liège, Belgique.
9. Abdeddaim, H. (2018), « contribution à l'étude de l'influence de la structure du réseau hydrographique sur le risque hydrologique : Cas des bassins de l'Est de l'Algérie », Université Mohamed Khider Bistra.
10. PAIOSA (2017), « Atlas des Marais, Bas-Fonds et Plaines Irrigables du Burundi »
11. Ollier C.& Poirée M. (1983), « les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages », Eyrolles, Paris.
12. Annabelle(2007), « Quelle approche scientifique des conflits liés à l'eau d'irrigation ? » article, Université de Paris 8, p1.
13. Pierre-E. (2003), « Mémento de l'irrigation »Ingénieurs sans frontières, Bruxelles,p4-

II. Sites de l'Internet

[1] Publications de Presse Burundaise, Province de Rutana - dégâts causés par la rivière MUSASA (consulté le 05/11/2022 à 20h15 min

[2]https://www.facebook.com/Ikiriho.The.Whole.Story/posts/894445760738414/, (publié le 21/11/2020)

[3]https://www.google.com/search?q=evolution+d%27inondation+au+burundi&sxsrf.(consult **é** le 08/11/2022 à 8h45min)

[4]https://www.futura-sciences.com/planete/définitionmeteorologie-inondation-6305/ (Consulté le 20/12/2022 à 15h00)

[5]https://www.climato-réalistes.fr/les-inondations-etaient-plus-frequentes-au-xixe-et-au-debut-du-xxe-siecle-quau-milieu-du-xxe-siecle/ (Consulté le 12/11/ 2022 à 10h25min).

[6]https://www.projetecolo.com/inondations-causes-et-consequences-433.html (Consulté le 20/11/2022 à 8h30min)

[7]https://www.projetecolo.com/inondations-causes-et-consequences-433.html(consulté le 12/11/2022à 8h35min).

[8]https://www.techno-science.net/glossaire_définition/Precipitation.html(consulté le 28/11/2022 à 3h35min)

[9] https://www.google.com/search?cycle_d'eau (consulté le 01/12/2022 à 10h 18min)

[10] http://www.semnon.fr/definition-d-un-bassin-versant (Consulté le 03/01/2023 à 7h00min)

[11]https://docplayer.fr/52191268-Chapitre-2-le-bassin-versant-et-son-complex-2-1-definition-du-bassin-versant-2-2-comportement-hydrologique-le-te(consulté le 20/02/2023 à3h12min**)**

[12]https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrographie/2-les-reseaux-hydrographiques. (Consulté le 20/02/2023 à 7h53min)

[13] https://studylibfr.com/doc/4410802/39-chapitre-4---statistiques-appliquées-à-la. (Consulté 10/11/2022)

ANNEXES

I. Les données climatiques à la station MUSASA

I.1. Précipitations

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
2001	139.1	80.8	58.8	141.3	6.5	15.2	63.5	75.5	90.0	96.8	28.5	187.6	46.3	21.2	70.6	12.0	0.0	0.0
2002	114.5	42.3	83.3	48.3	44.1	22.8	103.6	88.6	82.8	150.9	110.0	116.0	155.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	142.4	96.8	34.0	36.2	36.0	63.5	55.0	68.3	14.7	115.8	107.8	131.1	64.5	114.6	14.3	12.8	0.0	14.5
2004	20.3	43.1	88.5	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3	5.0
2005	100.0	70.3	15.7	83.8	6.7	79.6	0.0	14.3	1.7	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	160.0	0.0	0.0	0.0
2006	46.1	72.5	82.0	33.8	82.6	93.1	131.9	32.5	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0	81.6
2007	61.3	79.0	57.6	2.7	260.7	113.3	0.0	14.2	37.3	59.3	31.3	0.0	1.0	0.0	6.0	2.3	6.2	0.0
2008	148.4	51.3	96.0	99.1	113.8	86.3	0.0	0.0	1.0	7.7	76.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2009	37.8	48.5	73.8	96.8	77.1	127.8	137.3	53.8	61.1	147.1	2.5	47.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2010	61.8	125.3	8.8	109.6	135.1	85.1	40.8	123.5	5.3	2.0	10.3	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	341.0	0.0
2011	120.5	9.7	77.1	57.3	105.1	121.0	64.6	7.3	9.3	4.5	34.2	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2012	17.2	88.1	88.6	78.8	12.5	68.0	0.0	0.0	3.3	109.6	15.7	3.3	0.0	0.0	27.5	0.0	0.0	0.0
2013	54.1	254.9	74.1	234.1	97.0	60.1	98.8	267.7	123.5	91.8	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2014	69.0	139.8	41.3	25.0	112.6	214.6	80.1	65.1	104.5	16.0	28.8	13.8	0.0	5.0	21.7	0.0	0.0	0.0
2015	105.1	38.2	54.0	89.6	75.5	65.1	344.9	80.5	119.6	38.3	110.3	28.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
2016	112.0	46.5	87.6	95.0	6.5	54.6	13.3	50.8	98.3	98.3	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2017	59.3	181.3	91.3	60.5	64.8	73.6	66.0	140.8	244.1	116.8	37.2	138.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2018	62.1	59.6	3.0	51.3	141.4	108.8	53.8	47.3	291.4	143.4	196.6	23.7	36.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	111.3	43.1	183.1	11.0	57.5	131.6	53.8	84.1	57.8	35.5	152.1	68.3	103.0	64.5	32.8	0.0	0.0	0.0
2020	109.3	127.9	106.6	81.5	19.7	44.6	100.8	111.5	61.3	60.5	56.0	201.4	72.5	128.3	40.2	0.0	0.0	7.7
2021	71.0	147.6	92.3	147.9	130.4	82.3	146.8	150.9	34.7	93.0	169.6	77.3	81.6	59.6	91.8	0.0	0.0	0.0

Mois	Juillet			Aout			Semptembre			Octobre			Novembre			Décembre		
Décades	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
2001	0.0	2.0	25.7	0.0	18.7	0.0	4.5	21.2	115.3	57.1	34.3	54.5	94.6	25.8	0.5	117.6	25.8	159.8
2002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	62.1	16.0	121.6	104.6	91.0	79.8	135.6
2003	32.3	37.2	77.5	22.5	2.8	142.9	36.0	79.8	100.6	56.1	53.3	104.0	185.9	96.5	44.6	26.5	51.8	122.8
2004	100.6	8.0	12.0	177.1	68.5	62.0	119.6	139.9	114.3	86.6	86.6	24.2	42.6	144.4	45.5	39.3	0.5	51.6
2005	0.0	19.2	25.2	13.3	0.0	47.6	17.0	38.0	31.8	139.8	72.5	155.9	54.5	103.0	27.5	29.0	22.0	139.8
2006	0.0	31.7	58.6	4.5	1.3	51.3	225.2	131.3	183.3	91.3	210.0	76.1	110.6	96.3	44.3	252.4	63.0	7.5
2007	9.2	0.0	0.0	18.5	2.3	1.5	21.2	61.8	82.3	15.7	81.3	52.8	56.1	36.8	90.3	39.5	100.0	64.6
2008	0.0	0.0	71.0	41.8	58.3	5.8	9.5	26.2	139.4	34.5	132.1	22.0	32.3	41.2	39.5	124.8	124.8	85.5
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	312.0	16.8	11.8	49.6	223.7	116.0	29.7	319.0	320.0	47.3	94.1	323.0	30.0
2010	0.0	0.0	0.3	32.2	0.0	0.0	46.6	28.3	32.3	135.6	14.5	138.3	25.8	118.6	46.0	49.3	79.1	102.3
2011	379.0	0.0	0.0	1.2	27.8	11.2	16.0	28.7	11.7	120.0	126.1	83.0	125.6	102.0	30.2	103.6	66.0	11.3
2012	0.0	0.0	0.0	12.7	12.8	0.0	48.5	19.8	33.8	190.1	16.7	14.2	49.1	147.4	112.3	150.3	95.8	141.3
2013	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.5	18.7	0.0	75.1	50.0	88.6	123.1	224.1	41.3	62.3	75.1	73.8
2014	0.0	0.0	0.0	22.8	93.3	0.0	8.2	66.3	85.5	17.0	69.0	31.2	55.6	44.6	121.8	53.8	238.7	69.0
2015	0.0	0.0	0.0	0.0	60.8	0.0	0.0	21.7	5.7	20.3	82.6	40.3	262.9	64.6	13.8	122.3	201.9	128.8
2016	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	82.0	0.5	0.0	30.8	3.3	192.8	67.6	63.3	72.0	45.5	63.8
2017	0.0	0.0	0.0	59.3	0.0	0.0	7.0	7.5	47.6	104.8	56.8	104.0	31.5	116.6	94.1	44.6	91.5	84.5
2018	0.0	0.0	0.0	0.0	45.0	4.2	19.3	0.0	16.3	18.0	0.0	50.8	9.5	184.8	96.8	61.5	118.8	111.3
2019	0.0	16.7	0.0	3.8	0.0	0.0	39.7	8.0	4.0	40.7	28.5	143.4	39.8	51.6	58.6	64.8	146.4	95.5
2020	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	35.0	20.0	15.7	73.8	60.3	114.3	70.5	131.6	78.0
2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	41.2	0.0	0.0	95.5	12.7	5.5	22.3	61.6	108.3	60.8	33.2	92.1

I.2.Détermination des précipitations journalières

Jours /Années	2001	Préc.	2002	Préc.	2003	Préc.	2004	Préc.	2006	Préc.	2007	Préc.	2008	Préc.	2009	Préc.
1	01/01/2001	15.10	01/01/2002	0.0	01/01/2003	0.0	01/01/2004	25.0	01/01/2006	36.0	01/01/2007	12.1	01/01/2008	0.0	01/01/2009	0.0
2	02/01/2001	17.10	02/01/2002	13.2	02/01/2003	26.5	02/01/2004	0.0	02/01/2006	0.0	02/01/2007	0.0	02/01/2008	0.0	02/01/2009	0.0
3	03/01/2001	14.50	03/01/2002	21.2	03/01/2003	0.0	03/01/2004	0.0	03/01/2006	0.3	03/01/2007	18.0	03/01/2008	0.0	03/01/2009	0.0
4	04/01/2001	0.60	04/01/2002	15.1	04/01/2003	0.0	04/01/2004	7.0	04/01/2006	24.6	04/01/2007	13.0	04/01/2008	5.5	04/01/2009	0.0
5	05/01/2001	12.20	05/01/2002	7.9	05/01/2003	0.0	05/01/2004	0.0	05/01/2006	10.5	05/01/2007	7.0	05/01/2008	0.0	05/01/2009	0.0
6	06/01/2001	0.00	06/01/2002	1.8	06/01/2003	11.1	06/01/2004	0.0	06/01/2006	0.0	06/01/2007	0.0	06/01/2008	15.4	06/01/2009	0.0
7	07/01/2001	0.60	07/01/2002	2.0	07/01/2003	20.0	07/01/2004	4.9	07/01/2006	0.0	07/01/2007	88.0	07/01/2008	0.0	07/01/2009	5.1
8	08/01/2001	2.90	08/01/2002	0.0	08/01/2003	0.0	08/01/2004	0.0	08/01/2006	0.3	08/01/2007	2.4	08/01/2008	0.0	08/01/2009	0.0
9	09/01/2001	0.00	09/01/2002	0.0	09/01/2003	0.5	09/01/2004	0.0	09/01/2006	6.9	09/01/2007	0.0	09/01/2008	0.0	09/01/2009	0.0
10	10/01/2001	20.50	10/01/2002	0.0	10/01/2003	0.0	10/01/2004	9.3	10/01/2006	0.0	10/01/2007	9.6	10/01/2008	0.0	10/01/2009	0.0
11	11/01/2001	0.00	11/01/2002	0.0	11/01/2003	0.0	11/01/2004	0.9	11/01/2006	0.0	11/01/2007	0.0	11/01/2008	2.3	11/01/2009	0.0
12	12/01/2001	0.00	12/01/2002	18.7	12/01/2003	0.0	12/01/2004	0.0	12/01/2006	0.0	12/01/2007	15.1	12/01/2008	0.0	12/01/2009	0.0
13	13/01/2001	7.80	13/01/2002	1.0	13/01/2003	0.0	13/01/2004	16.9	13/01/2006	14.4	13/01/2007	0.0	13/01/2008	0.0	13/01/2009	0.0
14	14/01/2001	5.90	14/01/2002	1.9	14/01/2003	0.0	14/01/2004	0.0	14/01/2006	0.6	14/01/2007	0.0	14/01/2008	4.4	14/01/2009	0.0
15	15/01/2001	0.00	15/01/2002	0.0	15/01/2003	0.0	15/01/2004	0.0	15/01/2006	0.3	15/01/2007	10.0	15/01/2008	0.0	15/01/2009	0.0
16	16/01/2001	1.90	16/01/2002	0.0	16/01/2003	3.0	16/01/2004	3.8	16/01/2006	38.7	16/01/2007	0.0	16/01/2008	0.0	16/01/2009	19.7
17	17/01/2001	7.80	17/01/2002	0.0	17/01/2003	3.0	17/01/2004	0.0	17/01/2006	14.2	17/01/2007	0.0	17/01/2008	15.3	17/01/2009	4.0
18	18/01/2001	2.60	18/01/2002	0.0	18/01/2003	2.9	18/01/2004	15.9	18/01/2006	0.0	18/01/2007	3.1	18/01/2008	1.4	18/01/2009	0.0
19	19/01/2001	21.90	19/01/2002	25.4	19/01/2003	4.5	19/01/2004	1.4	19/01/2006	0.8	19/01/2007	0.0	19/01/2008	17.7	19/01/2009	0.3
20	20/01/2001	0.60	20/01/2002	0.6	20/01/2003	7.0	20/01/2004	0.0	20/01/2006	6.5	20/01/2007	0.0	20/01/2008	1.3	20/01/2009	19.0
21	21/01/2001	0.30	21/01/2002	4.8	21/01/2003	0.0	21/01/2004	0.0	21/01/2006	0.0	21/01/2007	0.0	21/01/2008	14.5	21/01/2009	34.7
22	22/01/2001	23.40	22/01/2002	15.0	22/01/2003	18.0	22/01/2004	6.0	22/01/2006	0.0	22/01/2007	0.0	22/01/2008	0.8	22/01/2009	0.0

Jours /Années	2010	Préc.	2011	Préc.	2012	Préc.	2013	Préc.	2014	Préc.	2015	Préc.	2016	Préc.
1	01/01/2010	15.0	01/01/2011	0.3	01/01/2012	0.0	01/01/2013	0.00	01/01/2014	0.0	01/01/2015	9.2	01/01/2016	0.0
2	02/01/2010	0.0	02/01/2011	0.0	02/01/2012	0.0	02/01/2013	8.00	02/01/2014	1.5	02/01/2015	16.5	02/01/2016	2.2
3	03/01/2010	0.0	03/01/2011	0.0	03/01/2012	0.0	03/01/2013	8.90	03/01/2014	0.0	03/01/2015	28.6	03/01/2016	0.0
4	04/01/2010	24.7	04/01/2011	0.0	04/01/2012	0.0	04/01/2013	2.00	04/01/2014	0.0	04/01/2015	3.7	04/01/2016	22.0
5	05/01/2010	0.0	05/01/2011	12.3	05/01/2012	0.0	05/01/2013	0.00	05/01/2014	0.0	05/01/2015	0.1	05/01/2016	0.0
6	06/01/2010	2.4	06/01/2011	6.0	06/01/2012	12.6	06/01/2013	4.50	06/01/2014	4.8	06/01/2015	0.0	06/01/2016	0.0
7	07/01/2010	17.4	07/01/2011	0.0	07/01/2012	0.0	07/01/2013	13.00	07/01/2014	9.8	07/01/2015	0.2	07/01/2016	0.0
8	08/01/2010	0.0	08/01/2011	0.0	08/01/2012	0.0	08/01/2013	9.30	08/01/2014	12.0	08/01/2015	11.5	08/01/2016	0.0
9	09/01/2010	12.0	09/01/2011	0.0	09/01/2012	0.0	09/01/2013	21.70	09/01/2014	0.0	09/01/2015	0.5	09/01/2016	39.5
10	10/01/2010	0.0	10/01/2011	2.0	10/01/2012	0.0	10/01/2013	0.00	10/01/2014	1.5	10/01/2015	0.0	10/01/2016	5.4
11	11/01/2010	0.0	11/01/2011	0.0	11/01/2012	0.0	11/01/2013	5.40	11/01/2014	17.0	11/01/2015	0.0	11/01/2016	0.0
12	12/01/2010	0.0	12/01/2011	2.4	12/01/2012	0.0	12/01/2013	0.00	12/01/2014	0.0	12/01/2015	12.5	12/01/2016	6.5
13	13/01/2010	0.0	13/01/2011	21.4	13/01/2012	0.0	13/01/2013	0.00	13/01/2014	0.0	13/01/2015	0.0	13/01/2016	38.4
14	14/01/2010	7.7	14/01/2011	1.4	14/01/2012	0.0	14/01/2013	10.40	14/01/2014	13.7	14/01/2015	0.0	14/01/2016	0.6
15	15/01/2010	0.0	15/01/2011	1.4	15/01/2012	17.6	15/01/2013	0.00	15/01/2014	0.0	15/01/2015	15.9	15/01/2016	12.2
16	16/01/2010	0.0	16/01/2011	1.0	16/01/2012	1.5	16/01/2013	10.70	16/01/2014	0.0	16/01/2015	1.0	16/01/2016	4.9
17	17/01/2010	0.0	17/01/2011	0.0	17/01/2012	0.0	17/01/2013	0.00	17/01/2014	10.0	17/01/2015	0.0	17/01/2016	23.3
18	18/01/2010	0.0	18/01/2011	0.0	18/01/2012	4.4	18/01/2013	0.00	18/01/2014	10.2	18/01/2015	0.0	18/01/2016	0.0
19	19/01/2010	0.0	19/01/2011	12.0	19/01/2012	1.1	19/01/2013	0.00	19/01/2014	0.0	19/01/2015	0.0	19/01/2016	0.0
20	20/01/2010	0.0	20/01/2011	0.0	20/01/2012	0.0	20/01/2013	40.50	20/01/2014	6.4	20/01/2015	12.4	20/01/2016	2.3
21	21/01/2010	3.2	21/01/2011	1.3	21/01/2012	0.0	21/01/2013	0.00	21/01/2014	4.0	21/01/2015	0.0	21/01/2016	5.5
22	22/01/2010	19.8	22/01/2011	0.0	22/01/2012	0.0	22/01/2013	0.00	22/01/2014	0.0	22/01/2015	7.2	22/01/2016	34.0

Jours /Années	2017	Préc.	2018	Préc.	2019	Préc.	2020	Préc.	2021	Préc.
1	01/01/2017	0.4	01/01/2018	0.0	01/01/2019	21.6	01/01/2020	0.00	01/01/2021	0.0
2	02/01/2017	11.5	02/01/2018	5.4	02/01/2019	0.0	02/01/2020	0.00	02/01/2021	0.0
3	03/01/2017	0.0	03/01/2018	1.2	03/01/2019	10.0	03/01/2020	0.00	03/01/2021	30.6
4	04/01/2017	0.0	04/01/2018	0.0	04/01/2019	0.0	04/01/2020	0.00	04/01/2021	0.0
5	05/01/2017	0.0	05/01/2018	0.0	05/01/2019	6.6	05/01/2020	7.20	05/01/2021	0.0
6	06/01/2017	0.0	06/01/2018	0.0	06/01/2019	1.8	06/01/2020	25.10	06/01/2021	0.0
7	07/01/2017	0.0	07/01/2018	0.0	07/01/2019	3.5	07/01/2020	9.50	07/01/2021	0.0
8	08/01/2017	36.5	08/01/2018	21.9	08/01/2019	6.5	08/01/2020	1.70	08/01/2021	13.7
9	09/01/2017	0.0	09/01/2018	0.6	09/01/2019	4.3	09/01/2020	20.90	09/01/2021	10.8
10	10/01/2017	0.0	10/01/2018	21.6	10/01/2019	0.0	10/01/2020	12.40	10/01/2021	1.6
11	11/01/2017	0.0	11/01/2018	0.0	11/01/2019	0.0	11/01/2020	10.90	11/01/2021	24.7
12	12/01/2017	0.0	12/01/2018	1.3	12/01/2019	0.6	12/01/2020	0.00	12/01/2021	0.0
13	13/01/2017	1.8	13/01/2018	0.0	13/01/2019	0.0	13/01/2020	4.00	13/01/2021	3.0
14	14/01/2017	0.0	14/01/2018	0.0	14/01/2019	5.0	14/01/2020	0.00	14/01/2021	1.6
15	15/01/2017	0.0	15/01/2018	0.0	15/01/2019	4.2	15/01/2020	10.00	15/01/2021	0.0
16	16/01/2017	0.0	16/01/2018	21.2	16/01/2019	96.0	16/01/2020	0.00	16/01/2021	25.7
17	17/01/2017	0.0	17/01/2018	0.0	17/01/2019	0.0	17/01/2020	0.00	17/01/2021	6.2
18	18/01/2017	0.0	18/01/2018	0.0	18/01/2019	9.1	18/01/2020	0.00	18/01/2021	0.0
19	19/01/2017	0.0	19/01/2018	0.0	19/01/2019	0.0	19/01/2020	4.60	19/01/2021	11.5
20	20/01/2017	8.5	20/01/2018	14.8	20/01/2019	0.0	20/01/2020	34.50	20/01/2021	32.2
21	21/01/2017	0.0	21/01/2018	0.0	21/01/2019	4.1	21/01/2020	0.00	21/01/2021	12.8
22	22/01/2017	0.0	22/01/2018	14.1	22/01/2019	0.0	22/01/2020	13.30	22/01/2021	0.4

Jours /Années	2001	Préc.	2002	Préc.	2003	Préc.	2004	Préc.	2006	Préc.	2007	Préc.	2008	Préc.	2009	Préc.
23	23/01/2001	2.30	23/01/2002	0.6	23/01/2003	2.4	23/01/2004	0.3	23/01/2006	1.3	23/01/2007	0.0	23/01/2008	0.0	23/01/2009	0.0
24	24/01/2001	1.40	24/01/2002	0.0	24/01/2003	0.0	24/01/2004	63.0	24/01/2006	0.0	24/01/2007	0.6	24/01/2008	3.2	24/01/2009	7.1
25	25/01/2001	0.60	25/01/2002	3.6	25/01/2003	1.3	25/01/2004	0.0	25/01/2006	0.0	25/01/2007	1.7	25/01/2008	7.1	25/01/2009	0.0
26	26/01/2001	0.00	26/01/2002	0.0	26/01/2003	0.0	26/01/2004	0.0	26/01/2006	0.0	26/01/2007	2.2	26/01/2008	6.4	26/01/2009	0.0
27	27/01/2001	0.60	27/01/2002	9.4	27/01/2003	0.0	27/01/2004	14.8	27/01/2006	0.0	27/01/2007	0.0	27/01/2008	0.0	27/01/2009	11.8
28	28/01/2001	1.80	28/01/2002	0.0	28/01/2003	0.0	28/01/2004	24.8	28/01/2006	0.0	28/01/2007	0.0	28/01/2008	0.0	28/01/2009	2.0
29	29/01/2001	2.10	29/01/2002	0.0	29/01/2003	0.0	29/01/2004	7.2	29/01/2006	0.0	29/01/2007	33.0	29/01/2008	10.2	29/01/2009	0.0
30	30/01/2001	2.80	30/01/2002	19.6	30/01/2003	0.0	30/01/2004	0.0	30/01/2006	6.0	30/01/2007	0.9	30/01/2008	0.0	30/01/2009	4.8
31	31/01/2001	0.00	31/01/2002	0.0	31/01/2003	0.0	31/01/2004	8.7	31/01/2006	7.1	31/01/2007	0.7	31/01/2008	0.0	31/01/2009	10.8
32	01/02/2001	0.00	01/02/2002	0.0	01/02/2003	0.0	01/02/2004	7.1	01/02/2006	3.4	01/02/2007	0.0	01/02/2008	0.0	01/02/2009	0.0
33	02/02/2001	0.00	02/02/2002	0.0	02/02/2003	0.0	02/02/2004	49.0	02/02/2006	0.0	02/02/2007	0.0	02/02/2008	0.0	02/02/2009	0.0
34	03/02/2001	0.00	03/02/2002	0.0	03/02/2003	0.0	03/02/2004	0.0	03/02/2006	0.0	03/02/2007	0.0	03/02/2008	0.0	03/02/2009	25.4
35	04/02/2001	0.00	04/02/2002	0.0	04/02/2003	0.0	04/02/2004	0.0	04/02/2006	0.0	04/02/2007	0.0	04/02/2008	1.0	04/02/2009	7.3
36	05/02/2001	28.50	05/02/2002	3.0	05/02/2003	0.0	05/02/2004	0.0	05/02/2006	0.0	05/02/2007	0.0	05/02/2008	34.1	05/02/2009	0.0
37	06/02/2001	3.50	06/02/2002	0.0	06/02/2003	0.0	06/02/2004	0.0	06/02/2006	0.4	06/02/2007	0.0	06/02/2008	8.0	06/02/2009	3.0
38	07/02/2001	15.60	07/02/2002	6.5	07/02/2003	0.7	07/02/2004	27.0	07/02/2006	0.0	07/02/2007	2.2	07/02/2008	0.0	07/02/2009	0.0
39	08/02/2001	18.40	08/02/2002	0.0	08/02/2003	13.5	08/02/2004	0.0	08/02/2006	0.0	08/02/2007	0.0	08/02/2008	0.0	08/02/2009	7.7
40	09/02/2001	18.80	09/02/2002	0.0	09/02/2003	7.4	09/02/2004	2.9	09/02/2006	0.0	09/02/2007	0.0	09/02/2008	0.0	09/02/2009	0.0
41	10/02/2001	3.90	10/02/2002	9.1	10/02/2003	0.0	10/02/2004	3.3	10/02/2006	0.0	10/02/2007	20.0	10/02/2008	2.5	10/02/2009	9.1
42	11/02/2001	0.00	11/02/2002	0.0	11/02/2003	0.0	11/02/2004	0.0	11/02/2006	0.0	11/02/2007	0.0	11/02/2008	9.9	11/02/2009	0.0
43	12/02/2001	0.00	12/02/2002	0.0	12/02/2003	0.0	12/02/2004	24.0	12/02/2006	17.0	12/02/2007	27.4	12/02/2008	4.0	12/02/2009	5.3
44	13/02/2001	0.00	13/02/2002	7.9	13/02/2003	0.0	13/02/2004	0.0	13/02/2006	0.0	13/02/2007	0.0	13/02/2008	0.5	13/02/2009	0.0
45	14/02/2001	0.00	14/02/2002	0.0	14/02/2003	0.0	14/02/2004	0.7	14/02/2006	3.0	14/02/2007	0.0	14/02/2008	0.0	14/02/2009	0.0
46	15/02/2001	0.00	15/02/2002	0.0	15/02/2003	27.0	15/02/2004	16.5	15/02/2006	3.2	15/02/2007	0.0	15/02/2008	4.0	15/02/2009	0.0

Jours /Années	2010	Préc.	2011	Préc.	2012	Préc.	2013	Préc.	2014	Préc.	2015	Préc.	2016
23	23/01/2010	2.0	23/01/2011	0.0	23/01/2012	15.0	23/01/2013	0.00	23/01/2014	1.5	23/01/2015	7.0	23/01/2016
24	24/01/2010	18.0	24/01/2011	10.2	24/01/2012	0.0	24/01/2013	0.00	24/01/2014	0.0	24/01/2015	12.5	24/01/2016
25	25/01/2010	0.0	25/01/2011	24.0	25/01/2012	0.0	25/01/2013	44.30	25/01/2014	0.0	25/01/2015	9.5	25/01/2016
26	26/01/2010	0.0	26/01/2011	0.0	26/01/2012	1.4	26/01/2013	0.00	26/01/2014	0.0	26/01/2015	0.0	26/01/2016
27	27/01/2010	0.0	27/01/2011	0.0	27/01/2012	0.0	27/01/2013	0.00	27/01/2014	5.2	27/01/2015	14.5	27/01/2016
28	28/01/2010	0.0	28/01/2011	0.0	28/01/2012	0.0	28/01/2013	1.70	28/01/2014	5.0	28/01/2015	2.5	28/01/2016
29	29/01/2010	0.0	29/01/2011	0.0	29/01/2012	0.0	29/01/2013	0.00	29/01/2014	0.0	29/01/2015	0.0	29/01/2016
30	30/01/2010	0.0	30/01/2011	22.4	30/01/2012	2.6	30/01/2013	0.00	30/01/2014	0.0	30/01/2015	10.0	30/01/2016
31	31/01/2010	0.0	31/01/2011	0.0	31/01/2012	0.0	31/01/2013	18.20	31/01/2014	4.4	31/01/2015	0.0	31/01/2016
32	01/02/2010	0.0	01/02/2011	22.4	01/02/2012	0.0	01/02/2013	0.00	01/02/2014	25.3	01/02/2015	0.0	01/02/2016
33	02/02/2010	0.0	02/02/2011	0.0	02/02/2012	2.8	02/02/2013	8.60	02/02/2014	0.0	02/02/2015	0.0	02/02/2016
34	03/02/2010	7.8	03/02/2011	2.2	03/02/2012	0.0	03/02/2013	4.00	03/02/2014	0.0	03/02/2015	7.6	03/02/2016
35	04/02/2010	32.0	04/02/2011	0.0	04/02/2012	0.7	04/02/2013	0.00	04/02/2014	35.6	04/02/2015	2.8	04/02/2016
36	05/02/2010	45.2	05/02/2011	8.8	05/02/2012	0.0	05/02/2013	0.00	05/02/2014	0.0	05/02/2015	0.0	05/02/2016
37	06/02/2010	43.0	06/02/2011	0.0	06/02/2012	0.0	06/02/2013	0.00	06/02/2014	35.9	06/02/2015	0.0	06/02/2016
38	07/02/2010	0.0	07/02/2011	5.6	07/02/2012	6.0	07/02/2013	38.20	07/02/2014	1.2	07/02/2015	0.0	07/02/2016
39	08/02/2010	5.5	08/02/2011	12.5	08/02/2012	3.6	08/02/2013	0.00	08/02/2014	0.0	08/02/2015	0.0	08/02/2016
40	09/02/2010	31.6	09/02/2011	0.0	09/02/2012	0.0	09/02/2013	9.00	09/02/2014	5.0	09/02/2015	0.0	09/02/2016
41	10/02/2010	0.0	10/02/2011	0.0	10/02/2012	0.0	10/02/2013	0.00	10/02/2014	0.0	10/02/2015	0.7	10/02/2016
42	11/02/2010	0.0	11/02/2011	9.3	11/02/2012	0.0	11/02/2013	18.00	11/02/2014	6.2	11/02/2015	14.2	11/02/2016
43	12/02/2010	0.0	12/02/2011	15.0	12/02/2012	0.0	12/02/2013	0.00	12/02/2014	7.8	12/02/2015	0.0	12/02/2016
44	13/02/2010	10.5	13/02/2011	0.0	13/02/2012	2.4	13/02/2013	42.00	13/02/2014	0.0	13/02/2015	10.0	13/02/2016
45	14/02/2010	3.0	14/02/2011	33.0	14/02/2012	0.0	14/02/2013	13.50	14/02/2014	15.5	14/02/2015	7.5	14/02/2016
46	15/02/2010	1.4	15/02/2011	0.0	15/02/2012	21.2	15/02/2013	32.30	15/02/2014	0.0	15/02/2015	0.0	15/02/2016

Jours /Années	2017	Préc.	2018	Préc.	2019	Préc.	2020	Préc.	2021	Préc.
23	23/01/2017	23.6	23/01/2018	21.3	23/01/2019	0.0	23/01/2020	2.30	23/01/2021	0.0
24	24/01/2017	0.0	24/01/2018	0.0	24/01/2019	0.7	24/01/2020	0.00	24/01/2021	0.0
25	25/01/2017	3.5	25/01/2018	0.4	25/01/2019	0.0	25/01/2020	3.00	25/01/2021	23.0
26	26/01/2017	0.0	26/01/2018	0.0	26/01/2019	0.0	26/01/2020	0.00	26/01/2021	0.0
27	27/01/2017	17.2	27/01/2018	0.0	27/01/2019	0.0	27/01/2020	5.50	27/01/2021	0.0
28	28/01/2017	0.0	28/01/2018	0.0	28/01/2019	0.0	28/01/2020	5.80	28/01/2021	0.0
29	29/01/2017	0.0	29/01/2018	0.0	29/01/2019	0.0	29/01/2020	0.00	29/01/2021	22.2
30	30/01/2017	0.0	30/01/2018	0.0	30/01/2019	0.0	30/01/2020	19.00	30/01/2021	0.0
31	31/01/2017	17.4	31/01/2018	0.0	31/01/2019	0.0	31/01/2020	0.00	31/01/2021	11.5
32	01/02/2017	0.0	01/02/2018	0.0	01/02/2019	0.0	01/02/2020	2.50	01/02/2021	7.8
33	01/02/2017	0.0	02/02/2018	0.0	02/02/2019	6.6	02/02/2020	6.10	02/02/2021	0.0
34	02/02/2017	26.2	03/02/2018	0.0	03/02/2019	0.0	03/02/2020	0.50	03/02/2021	13.8
35	03/02/2017	48.0	04/02/2018	0.0	04/02/2019	0.0	04/02/2020	2.20	04/02/2021	31.5
36	04/02/2017	0.0	05/02/2018	0.0	05/02/2019	1.3	05/02/2020	0.50	05/02/2021	0.0
37	05/02/2017	5.0	06/02/2018	0.0	06/02/2019	0.0	06/02/2020	0.00	06/02/2021	7.2
38	06/02/2017	3.9	07/02/2018	0.0	07/02/2019	0.0	07/02/2020	0.00	07/02/2021	4.5
39	07/02/2017	0.0	08/02/2018	0.0	08/02/2019	0.0	08/02/2020	0.00	08/02/2021	6.2
40	08/02/2017	0.0	09/02/2018	1.8	09/02/2019	0.0	09/02/2020	0.00	09/02/2021	0.0
41	09/02/2017	38.0	10/02/2018	8.1	10/02/2019	33.2	10/02/2020	0.00	10/02/2021	0.0
42	10/02/2017	7.9	11/02/2018	7.2	11/02/2019	0.0	11/02/2020	0.00	11/02/2021	0.0
43	11/02/2017	0.0	12/02/2018	0.0	12/02/2019	0.0	12/02/2020	0.00	12/02/2021	0.0
44	12/02/2017	0.0	13/02/2018	0.0	13/02/2019	0.0	13/02/2020	12.00	13/02/2021	0.0
45	13/02/2017	0.0	14/02/2018	0.0	14/02/2019	0.0	14/02/2020	0.00	14/02/2021	6.8
46	14/02/2017	0.0	15/02/2018	0.0	15/02/2019	0.0	15/02/2020	0.00	15/02/2021	0.0

II. Les abaques de calcul des ouvrages hydrauliques de dalot dans une section rectangulaire

a) Abaque de calcul de la hauteur d'un dalot

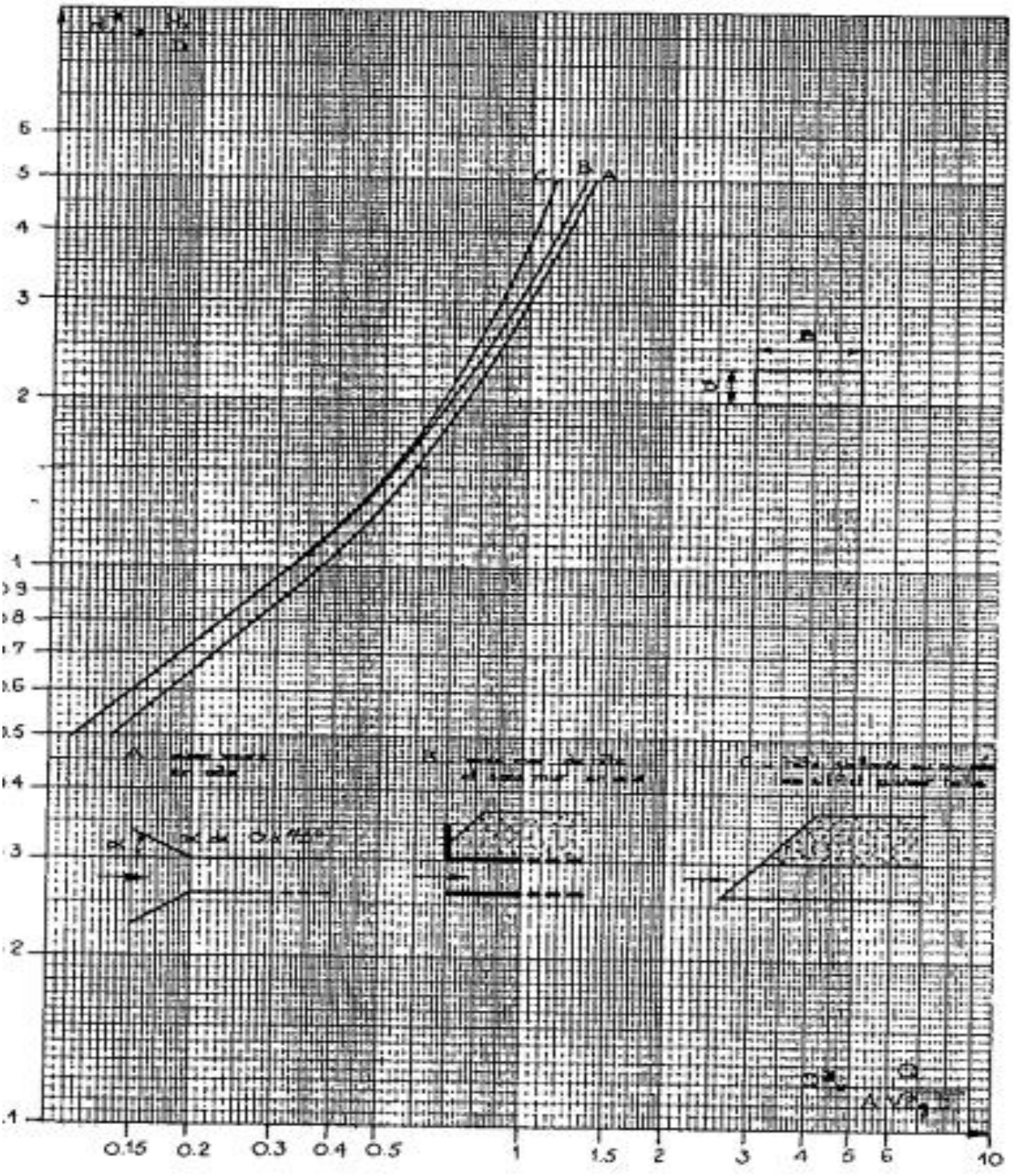


Fig. 77. Sortie libre. Dalots rectangulaires.

b) **Abaque de calcul de la pente critique d'un dalot**

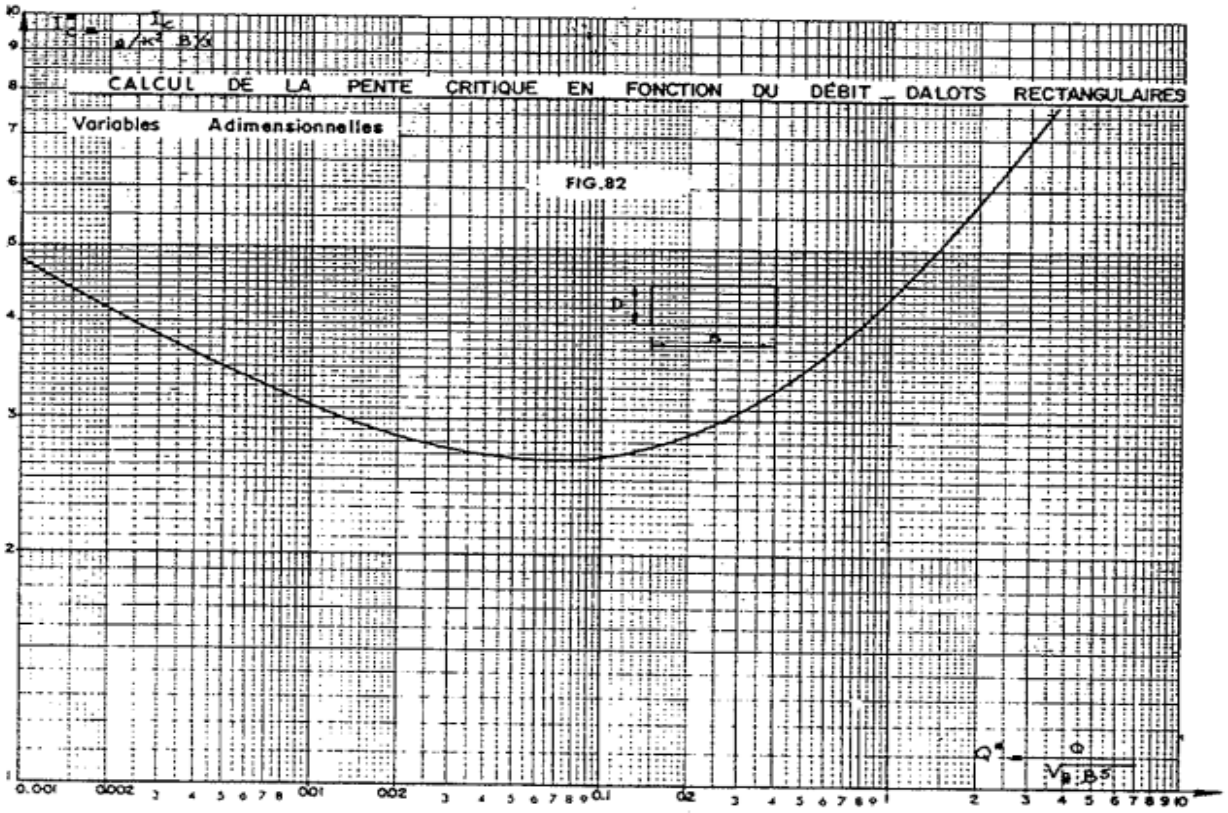


Fig. 82. Calcul de la pente critique en fonction du débit. Dalots rectangulaires.

c) **Abaque de calcul de la vitesse critique d'un dalot**

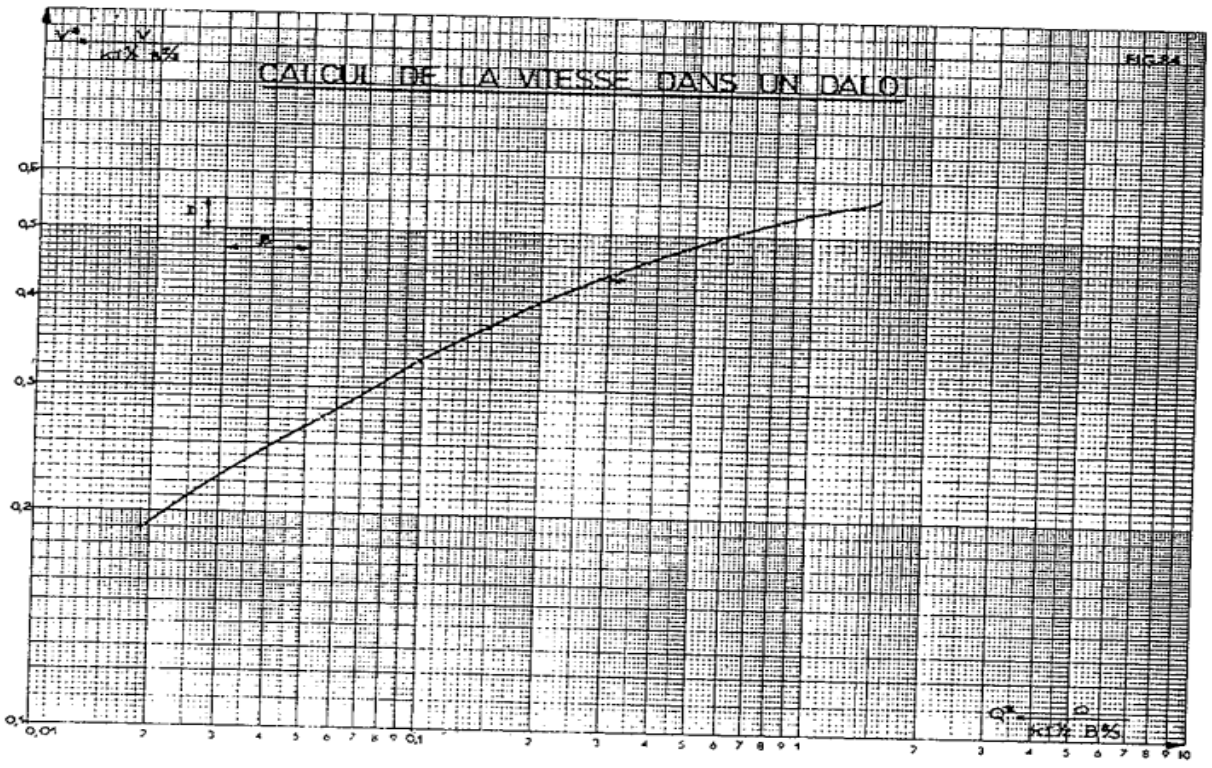


Fig. 84. Calcul de la vitesse dans un dalot.