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

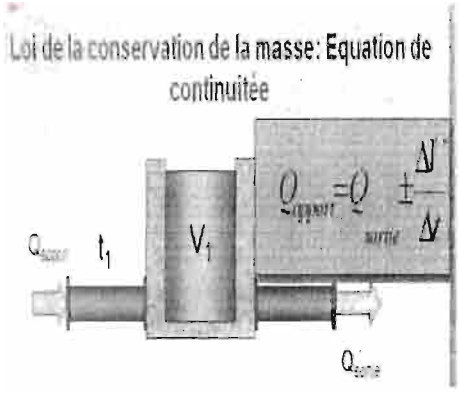
Modelisation du système d'alimentation en eau potable : appui de l'outil d'aide pour la prise en charge de décision (apanet) décision support system : D.S.S cas pratique de l'étude du projet dans la zone de Gihanga ; une alimentation en eau potable appuyée par des concepts hydrologiques

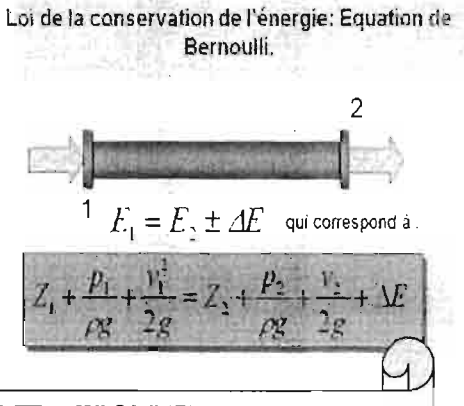
Klirura, Jean Claude; Nutwiwe, Aimable; Sous la direction de : Ir. & M.sc. Niyonzima William

2012-02
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2275

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

UNIVERSITE DU BURUNDI
INSTITUT TECHNIQUE SUPERIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL





MODELISATION DU SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE : APPUI DE L'OUTIL D'AIDE POUR LA PRISE DE DECISION : (EPANET) "**DECISION SUPPORT SYSTEM : D.S.S.** " CAS PRATIQUE DE L'ETUDE DU PROJET DANS LA ZONE DE GIHANGA, UNE ALIMENTATION EN EAU POTABLE APPUYEE PAR DES CONCEPTS HYDROLOGIQUES.



Par :

KIRURA JEAN CLAUDE
Et
NUTWIWE AIMABLE

Projet de fin d'études présenté publiquement en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Industriel en Génie Civil

Sous la direction de :
Ir. & M.sc. NIYONZIMA William

FEVRIER 2012

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES i
DEDICACES iv
REMERCIEMENTS v
LISTE DES ABREVIATIONS vi
LISTE DES FIGURES vii
LISTE DES TABLEAUX viii

PARTIE.I. DESCRIPTION DU SYSTEME HYDROLOGIQUE

CHAP.I. APERCUS SUR LE CYCLE DE L'EAU 1
I.1.Introduction 1
I.1.1. Etat et situation de l'eau 1
I.1.2. Stocks, flux et inertie des systèmes 1
I.1.2.1.Volume 1
I.1.2.2. Flux 2
I.1.2.3. Inertie des systèmes 2
I.2. Le cycle d'eau 2
I.2.a. Le cycle hydrologique 2
I.2.b. Définition et composante du cycle hydrologique 2
1.2. c. Répartition globale de l'eau 4
I.3.Le bilan hydrologique d'un bassin versant 5
I.4. Les ressource en eau du pays 9
I.5. Le climat du Burundi 11
I.5.1. Les éléments du climat 12
A. Les températures 12
B. Les pluies et humidité atmosphérique 12
I.5.2. Données météorologiques en rapport avec la commune GIHANGA 12

CHAP. II : CONSIDERATIONS HYDROLOGIQUES ET GEOLOGIQUES DU SOL 21
II.1. Introduction 21
II.2. Aspect général du relief 21
II.3. Impact du climat sur l'hydrologie 22
II.4. Système de collecte des eaux pluviales et son utilisation 22
II.5.La nature du sol et la végétation 22
II.6. Le comportement du sol vis-à-vis de l'eau 23
II.6.1 Les types de sol 23
II.6.2. L'évolution de l'eau dans le sol 25
II.7. Quelques caractéristiques physiques et physiographiques d'un bassin versant 26
II.7.1. Définition d'un bassin versant 26
II.7.2. La superficie d'un bassin versant 28
II.7.3. La forme du bassin versant 28
II.7.3.1. Coefficient de compacité 29
II.7.3.2. Coefficient de forme 29
II.7.3.3. Elancement 29
II.7.4. Courbe hypsométrique 29
II.7.5. Le coefficient de cultivabilité 30
II.7.6. Notion de rectangle équivalent 30

II.7.7. Pente moyenne 30
II.7.8. Densité hydrographique 31
II.7.9. Autres caractéristiques d'un bassin versant 31
II.7.9.1. perméabilité du sol 31
II.7.9.2.couvert végétal 31
II.8. Analyse statistique des données pluviométriques 32
II.8.1. Importance des données météorologiques 32
II.8.2. Conséquence : analyse du ruissellement 33
II.8.2.1. causes du ruissellement 33
II.8.2.2. Les effets du ruissellement 33
II.8.2.3. L'hydrogramme d'un bassin versant 34
A. Définition et utilité 34
B. Représentation d'un hydrogramme type 34
II.8.2.4. Coefficient de ruissellement 35

CHAP.III : EVALUATION DES DEBITS PLUVIAUX 37
III.1. Généralités 37
III.2. Construction d'un réseau d'isochrones 37
III.2.1. Définition et utilité 37
III.2.2. méthode utilisée 37
III.2.3. calcul du temps de concentration 38
III.3. Calcul des débits de pointe 41
III.3.1. Modèles donnant uniquement le débit de pointe 41
III.3.1.1. Méthode rationnelle classique 41
III.3.1.2. Méthodes superficielles et linéaires (France) 43
III.3.1.3. Modèle de TURRAZA 43
III.3.2. Modèles de calcul de l'hydrogramme de ruissellement 44
III.3.2.1. La méthode rationnelle avancée 44
III.3.2.2. Méthode de l'hydrogramme unitaire du SCS 46
III.3.2.3. Détermination de la quantité à retenir lors d'une précipitation 48
III.3.2.4. Construction d'un hyétogramme synthétique 48
III.3.2.4.1. Notion d'hyétogramme synthétique 48
III.3.2.4.2. Méthode SBH 49

PARTIE II : MODELISATION ET REGULATION DU CYCLE HYDROLOGIQUE

CHAP.IV : CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT 51
IV.1. Cartographie numérique et système d'information géographique 51
IV.1.1. Système d'Information Géographique 51
1. Définition 51
2. Composition d'un SIG 51
3. Structure des données pour les cartes thématiques 53
IV.1.2. Délimitation du bassin versant 54
IV.2. Les caractéristiques des sous bassins versants 54
IV.2.1. La superficie des sous bassins versants 54
IV.2.2. Occupation des sous bassins versants de GIHANGA 57
IV.2.3. Pentes 58
IV.3. Calcul du débit de pointe 59
IV.3.1. Prise en compte de la forme du bassin versant 59

IV.3.2. Calcul du débit de projet.....59
IV.3.2.1. Evaluation du coefficient de ruissellement.....59
IV.3.2.2. Calcul du débit de pointe proprement dit et du volume maximal à retenir.....59

CHAP.V : MODELISATION DU TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE A L'AIDE DE L'EPANET.....62

V.1. GENERALITES SUR EPANET..... 62
Nœud de demande..... 62
Baches..... 63
Reservoir..... 63
Tuyaux..... 63
Pompes..... 65
Vannes..... 65

V.2.L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL DE BASE D'EPANET..... 66

V.3. INTRODUCTION SUR LE MODEL..... .67
V.4. MANIPULATION DES OBJETS..... 67

Nœuds.....67
Arcs.....68
Textes.....68
Courbes.....68
Commandes.....68

V.5. LA SIMULATION.....68
V.6. LE TRACE DU RESEAU..... 68
V.7. SAISIE DES PROPRIETES..... 68
V.8. PRESENTATION DES RESULTATS..... 69
V.8. 1. Présentation du schéma du réseau d'A.E.P étudié..... 69
V.8. 1.1. Affichage des résultats sur le schéma (Méthode d'Animation)..... 70
V.8. 1.2. Affichage des résultats à l'aide d'un graphique..... 70
Pression dans les nœuds..... 70
Vitesses de l'eau dans les conduites..... 70
V.6. 1.3. Affichage des résultats à l'aide d'un tableau..... 71

CHAP.VI : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS..... 72

BIBLIOGRAPHIE..... 73

DEDICACES

A Dieu Tout Puissant,
A mes regrettés parents,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A mes frères et sœurs en christ,

A tous ceux qui je suis chers,

A tous ceux qui sont fiers de l'aboutissement de ce travail,

A mon collègue Aimable NUTWIWE,

Je dédie ce travail.

KIRURA Jean Claude,

A Dieu Tout Puissant,

A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A mes oncles et tantes,

A mes cousins et cousines,

A tous ceux qui me sont chers,

A mon collègue KIRURA Jean Claude,

Je dédie ce travail.

Aimable NUTWIWE.

REMERCIEMENTS

Avant de livrer le présent ouvrage aux impressions du lecteur, il nous est d'une grande joie d'exprimer notre profonde gratitude à l'endroit de toutes les personnes ayant contribué à son aboutissement.
Nos vifs remerciements s'adressent à tous les professeurs de l'Institut Technique Supérieur, Département de Génie Civil pour la formation tant scientifique que morale dont ils nous ont dotés.

Nous voudrions qu'un témoignage de reconnaissance aille envers le **Msc Ir William NIYONZIMA,** Directeur de ce présent travail, qui a bien accepté de diriger ce projet malgré ses multiples obligations, se stigmatise. En lui nous avons bénéficié de sa compétence, son expérience, son dévouement et ses conseils de guide.

Nous serrons taxés d'ingrats si nous passons sous silence le soutien moral et matériel dont nous avons bénéficié tout au long de notre formation de la part de nos familles, de touts les professeurs et enseignants depuis l'école primaire jusqu'à l'Université ainsi que des étudiants et du personnel de l'université du Burundi.

Enfin, nous ne saurions terminer sans manifester notre profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'accomplissement de ce travail.

A DIEU nous disons: haute gloire, louanges éternelles pour le plan merveilleux qu'il a pour nous.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

C N: Curve Number

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

RN: Route Nationale

SIG: Système d'information géographique

SOGREAH : Société Grenobloise d'Expertise Appliquée en Hydraulique

ISABU : Institut des sciences de l'agriculture du Burundi

3D: Trois Dimensions

N.M: Niveau de Mer

IDF: Intensité-Durée-Fréquence

SCS : Soil Conservation Service;

SBH: Synthetic Block Hyetograph

I-D-F :Intensite- Dure- Frequence

GIS : Geographic Information System

OCHA :Office for the coordination of Humanitarian Affairs

A.E.P: Alimentation en eau potable

E.P.A: Environnemental Protection Agency

A.B.N : Autorité du Bassin du Nil

O.M.V.S : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

C.B.L.T : Commission du Bassin du Lac Tchad

I.B.N : Initiative du Bassin du Nil

LISTE DE FIGURES

Figure I.1 : Le cycle hydrologique
Figure I.2. Répartition globale de l'eau
Figure I.3.Répartition des eaux dans le monde
Figure I.4: Bilan hydrologique d'un bassin versant
Figure I.5.Représentation graphique des précipitations relevées à la station de Randa
FigureI.6 Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Muzinda
FigureI.7. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Bujumbura-Aeroport
Figure.I.8. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Bujumbura-Institut pédagogique
Figure.I.9. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Gihanga
Figure.I.10.Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Rukoko
Figure.I.11.Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Nyakagunda
Figure.I.12.Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Mparambo
Figure.I.13.Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Cibitoke
Figure I.14. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Imbo Sms
Figure.I.15. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Mpanda
Figure.I.16 Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Maramvya
Figure.I.17. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Musigati
Figure I.18. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de kivoga
Figure II.1. : Comportement des différents sols vis-à-vis de l'eau
Figure II.2 : L'évolution de l'eau dans le sol
Figure II.3: Vue en plan et Coupe I-I d'un bassin versant
FigureII.4: Limites du bassin versant d'un cours d'eau
FigureII .5. Représentation schématique d'un bassin versant d'une façon générale
Figure II.6. La forme du bassin versant et son influence sur l'hydrogramme
Figure II.7. Forme de l'hydrogramme
Figure III.1.Maillage d'un bassin versant
Figure IV.1. Image de GIHANGA prise satellite (Raster : 90x90m de résolution)
FigureIV. 2. Image sélectionnée par la méthode circulaire
Figure IV.3 : carte du Burundi avec la localité de GIHANGA
FigureIV.4.Carte de la province de bubanza
Figure IV.5: Représentation schématique des sous bassins bassins versants de la localité de Gihanga
Figure IV. 6. Cartes des pentes en %
Figure V. 1. Schéma du réseau maillé de la zone d'études
Figure V. 1. Présentation d'un cas de simulation des pressions dans les nœuds et des vitesses dans les conduites
Figure V. 2a et b : Présentation par la méthode graphique des pressions dans les nœuds (Nœud 15) et des vitesses dans les conduites (Conduite28)
Figure V. 3a et b : Présentation par la méthode de tableau des pressions dans les nœuds et des pertes de charges dans les conduites

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Etat et situation de l'eau
Tableau I.2. La répartition des eaux dans réservoirs
Tableau 1.3.Estimation de la distribution globale de l'eau
Tableau I.4. La quantité d'eau disponible à l'intérieur
Tableau I.5. Bilan hydrologique d'une année moyenne
Tableau I.6. Différentes stations de la région de l'Imbo
Tableau II.1 : Coefficient volumétrique de ruissellement
Tableau II.2 : Taux de saturation de projet dans la formule de BOURRIER
Tableau III.1 : Valeur du coefficient k dans le modèle de Yen et Chow
Tableau III.2 : Valeur du coefficient N dans la formule de Yen et Chow
Tableau III.3 : Valeurs du coefficient n dans le modèle de KERBY
Tableau III.4 : Principes de génération d'un hydrogramme de ruissellement
Tableau III.5 : Valeurs des paramètres régionaux d'ajustement
Tableau III.6 : Comparaison des lois I-D-F de l'IGEBU
Tableau III.7 : calcul de l'averse unitaire d'après SCS
Tableau IV.1.Sous bassins versants de GIHANGA et leurs différentes superficies

PARTIE I : APPROCHE THEORIQUE : DESCRIPTION DU SYSTEME HYDROLOGIQUE

CHAP. I : APERCU SUR LE CYCLE DE L'EAU

I.1.Introduction

Le cycle d'eau, appelé aussi le cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de chargements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années.

I.1.1. Etat et situation de l'eau

Classiquement, on schématise les états et situations de l'eau dans le cycle de façon suivante :

Etats	Principaux stocks	Phénomènes de transport
Vapeurs, nuages, brouillards	Humidité atmosphérique Evapotranspiration	Evaporation
Liquide	Océans, mers, lacs, eaux souterraines	Pluie, cours d'eau, nuages, circulation souterraine
Solide	Glaciers, manteaux, neigeux, calottes polaires	Neige, grêle, écoulement des glaciers

Tableau I.1. Etat et situation de l'eau.

I.1.2. Stocks, flux et inertie des systèmes.

Les quantités d'eau correspondantes à chacun des termes du tableau I.1 et leurs vitesses auxquelles se font les échanges sont difficiles, mais on pourra retenir pour fixer les ordres des grandeurs, les chiffres fournis par G. REMENIERAS.

I.1.2.1 Volume

En surface, les terres émergées ne représentent que 146.10^6 km^2 sur une surface totale de la planète de 510.10^6 km^2 (soit exclusivement ¼). Cette disparité entre océans et terres est beaucoup plus accentuée entre eaux douces et eaux salées.

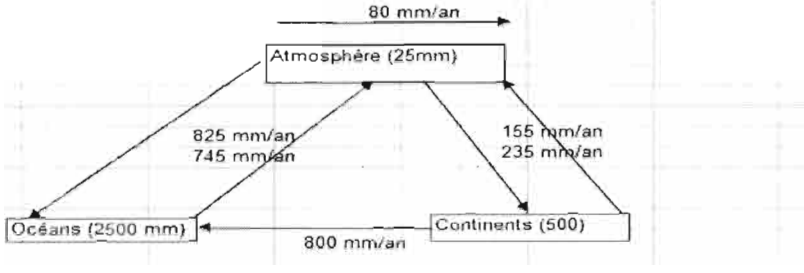
Le volume total des eaux douces est d'environ 36.10^6 km^3, soit 2,8 % des réserves totales en eau. Par ailleurs, les eaux se répartissent dans différents réservoirs comme suit :

Réservoirs	Volume (10^6 km^3)	Pourcentage (%)
Océans	1370	97,25
Calottes glaciers et glaciers	23	2,05
Eau souterraine	9,5	0,68
Lacs	0,125	0,01
Humidité des sols	0,065	0,005
Atmosphère	0,013	0,001
Fleuves et rivières	0,0017	0,0001
Biosphère	0,0006	0,00004

Tableau I.2. La répartition des eaux dans réservoirs.

I.1.2.2. Flux

La vitesse avec laquelle l'eau circule est très variable, généralement, on prend l'année comme période de référence. Les flux annuels sous forme liquide et gazeuse (les plus importantes) sont sensiblement les suivants :



I.1.2.3. Inertie des systèmes

On appelle « taux de renouvellement » le rapport du stock au flux qui l'alimente et « temps de séjour » l'inverse du taux de renouvellement. Plus le temps de séjour est important, plus l'inertie du système est important : c'est par exemple : le cas des eaux souterraines où il atteint couramment, pour des nappes importantes 10 à 50000 ans ; en revanche la quasi-totalité des eaux continentales ont un temps de séjour relativement limite de l'ordre de quelques jours à un an.

I.2. Le cycle d'eau.

I.2.a. Le cycle hydrologique.

Dans la nature, les énormes quantités d'eau dispersées sur le globe terrestre subissent régulièrement de changement d'état : solide, liquide et gazeux.

L'eau est un cycle qui n'a ni commencement ni fin. On la trouve à l'état solide sous forme de glace, de neige dans les régions froides et de grêles sous les conditions spéciales de précipitations. L'état liquide est la forme la plus courante dans la nature. Sous l'effet du rayonnement du soleil, l'eau s'évapore en quantité importante et ces vapeurs se regroupent pour provoquer des pluies sous forme liquide (pluie) ou solide (grêle).

I.2.b. Définition et composante du cycle hydrologique

La notion de cycle hydrologique englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique surviennent conjointement. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin.

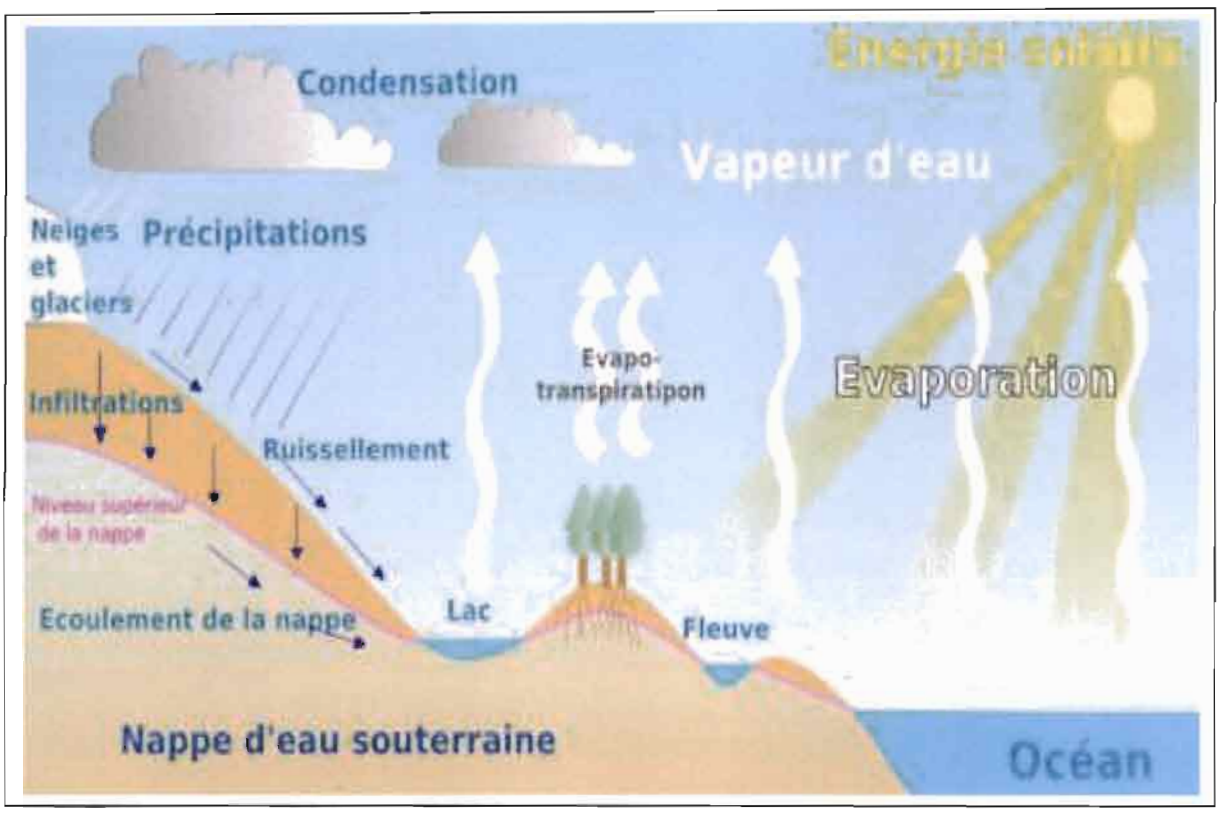


Figure I.1 : Le cycle hydrologique

Source : www.veoliaeau.com

Les éléments qui composent le cycle de l'eau sont respectivement :

- Les précipitations : eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) et / ou solide (neige, grésil, grêle) ainsi que les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...).
- L'évaporation : passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique.
- L'évapotranspiration : englobe les processus d'évaporation et de transpiration de la végétation
- L'interception : processus selon lequel la pluie (ou dans certains cas la neige) est retenue par la végétation, et repart par évaporation directe, sans entrer dans le cycle d'eau du bassin versant.
- Le stockage dans les dépressions : processus au cours du quel l'eau est retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant une averse.
- Le ruissellement ou écoulement de surface : mouvement de l'eau sur ou dans les premiers horizons du sol (écoulement de subsurface), consécutif à une précipitation.
- L'infiltration : mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol.
- La percolation : mouvement profond de l'eau dans les sols faisant suite à l'infiltration. La répartition des eaux peut se faire d'une manière quantitative et qualitative à l'**échelle du globe**, et par rapport aux différentes composantes du cycle hydrologique.

1.2. C. Répartition globale de l'eau

- Pour une explication plus détaillée quant à savoir où se trouve l'eau de la Terre, observez le graphique et le tableau ci-dessous. Maintenant vous savez que le cycle de l'eau décrit le mouvement de l'eau sur Terre et imaginez donc que le graphique et le tableau représentent l'eau à un seul point dans le temps. Si vous comparez avec les chiffres d'il y a un millier ou un million d'années, c'est sûr que les chiffres seront différents!
- Remarquez que sur 1 386 000 000 de km^3 d'eau sur toute la terre, environ 97 % est saline. En ce qui concerne l'eau douce, plus de 68 % se trouve dans la glace et les glaciers. D'autre 30 % se trouve dans le sol. Les sources d'eau douce de surface, comme les rivières et les lacs, totalisent 93 100 km^3, ce qui représente 1/150 d'un pourcent de la quantité totale de l'eau. Cependant, les rivières et les lacs sont les sources de la plupart de l'eau qui est utilisée par les hommes tous les jours.

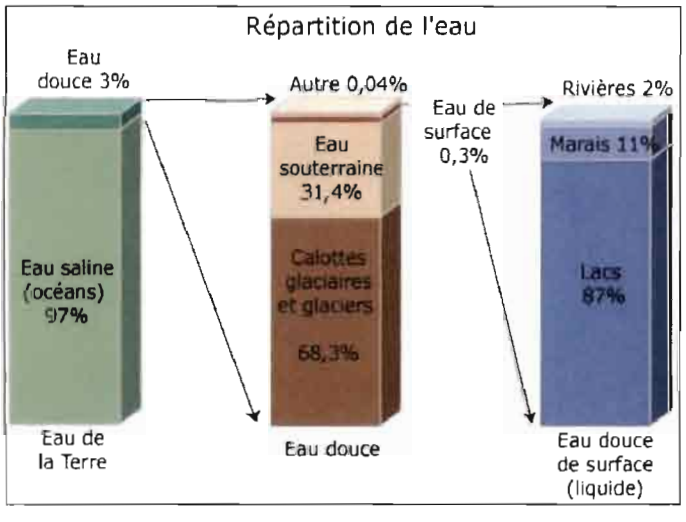


Figure I.2.Répartition globale de l'eau

Source : www.fao.com

Estimation de la distribution globale de l'eau :				
Source d'eau	**Volume d'eau (km^3)**	**Volume d'eau (miles3)**	**% d'eau douce**	**% d'eau totale**
Océans, mers & baies	1, 338, 000,000	321,000,000	--	96.5 %
Calottes glaciaires, glaciers et neiges éternelles	24,064,000	5,773,000	68.7 %	1.74 %
Eau souterraine	23,400,000	5,614,000	--	1.7 %
Douce	10,530,000	2,526,000	30.1 %	0.76 %
Saline	12,870,000	3,088,000	--	0.94 %
Humidité du sol	16,500	3,959	0.05 %	0.001 %
Hydro laccolithe & pergélisol	300,000	71,970	0.86 %	0.022 %
Lacs	176,400	42,320	--	0.013 %
d'eau douce	91,000	21,830	0.26 %	0.007 %
d'eau saline	85,400	20,490	--	0.006 %
Atmosphère	12,900	3,095	0.04 %	0.001 %
Eau marécageuse	11,470	2,752	0.03 %	0.0008 %
Rivières	2,120	509	0.006 %	0.0002 %
Eau biologique	1,120	269	0.003 %	0.0001 %
Total	1,386,000,000	332,500,000	-	100 %

Tableau 1.3.Estimation de la distribution globale de l'eau

La répartition des eaux peux se faire de manière quantitative et qualitative à l'échelle du globe, et par rapport aux différentes composantes du cycle hydrologique

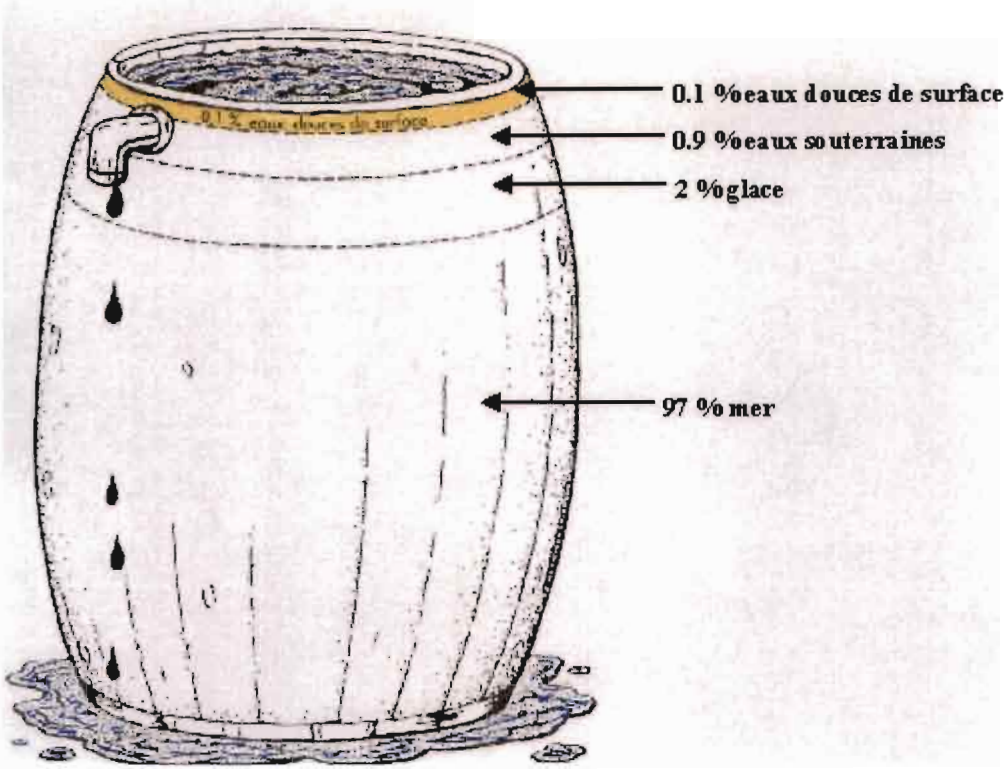


Figure.1.3.Répartition des eaux dans le monde

Source : www.fao.com

La terre apparaît comme une planète recouverte en grande partie d'eau (planète bleue). Mais la répartition de l'eau à la surface de la planète est très inégale. Les océans occupent une superficie à peu près égale à 70% de la surface du globe et représentent 97% de la masse totale d'eau dans la biosphère. Le reste se trouve sur les continents sous forme de neige, de glace, d'eau courante ou souterraine. Une infime partie est dans l'atmosphère sous forme de vapeur. Sur cette réserve d'eau douce plus des ¾ sont immobilisées sous forme de glaces polaires.

A l'**échelle continentale** et selon les zones géographiques, on se doit de noter d'énormes disparités entre les régions quasiment dépourvues d'eau et celles qui en bénéficient à l'excès

Le cycle de l'eau peut-être analysé schématiquement selon les trois éléments suivants :

- Les précipitations,
- le ruissellement ou écoulement de surface et l'écoulement souterrain,
- l'évaporation.

Dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrologique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace (entité naturelle en générale) et dans le temps, à savoir l'année hydrologique (période d'une année très souvent différente de l'année civile).

L'**équation du bilan hydrique** se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés :

$$P+S=R+E+(S+\Delta S) \qquad (I.1)$$

Avec:

P : précipitations (liquide et solide) [mm] ou [m^3] ;

S : ressources disponible à la fin de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm] ;

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm] ;

E : évaporation (y compris évapotranspiration) ;

$S+\Delta S$: ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm].

Sous sa forme la plus générale et pour une période déterminée (mois, année), ce bilan peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E=I-O\pm \Delta S \qquad (I.2)$$

Avec

E : évaporation [mm] ou [m^3/s],

I : flux d'eau entrant [mm] ou [m^3/s],

O : flux d'eau sortant [mm] ou [m^3/s],

ΔS : variation de stockage [mm] ou [m^3/s].

Si l'on considère que la variation de stock est nulle d'une année à une autre, la différence entre les débits entrants (les précipitations) et sortants correspond au déficit d'écoulement. Ce déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide de mesures (pluies et débits) ou de méthodes de calcul (formules de Turc et Coutagne).

Formule de Turc :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \qquad (I.3)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle [°C].

$L = 300 + 25\,T + 0.05\,T^3$.

Formule de Coutagne :

$$D = P - m \cdot P^2 \qquad (I.4)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle [mm],

m= 1/(0.8 + 0.16 T) : coefficient régional (m=0.42 pour la France).

I.3.Le bilan hydrologique d'un bassin versant

Certains chercheurs ont essayé de faire le bilan de l'ensemble des flux qui interviennent dans le cycle de l'eau à l'échelle d'un pays. C'est intéressant par la planification globale des ressources en eau d'un pays, mais assez rarement utilisé. La phase terrestre du cycle de l'eau s'analyse beaucoup mieux à l'échelle d'un bassin versant, quelle que soit sa taille, ce qui bien sûr est indépendant de tout découpage administratif ou politique.

Ce qui a mené en Afrique, comme sur d'autres continents, à créer des organismes multinationaux chargés d'étudier spécifiquement les problèmes liés aux grands bassins versants, tels que l'ABN, l'OMVS, la CBLT, IBN, etc.

La figure suivante présente schématiquement les flux qui composent le cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. En réalité, il n'est pas facile d'identifier chaque composante. Les seules grandeurs que l'on peut mesurer de façon assez simple et avec une précision satisfaisante sont :
-Les précipitations P
-L'écoulement à l'exutoire Q
-L'évaporation

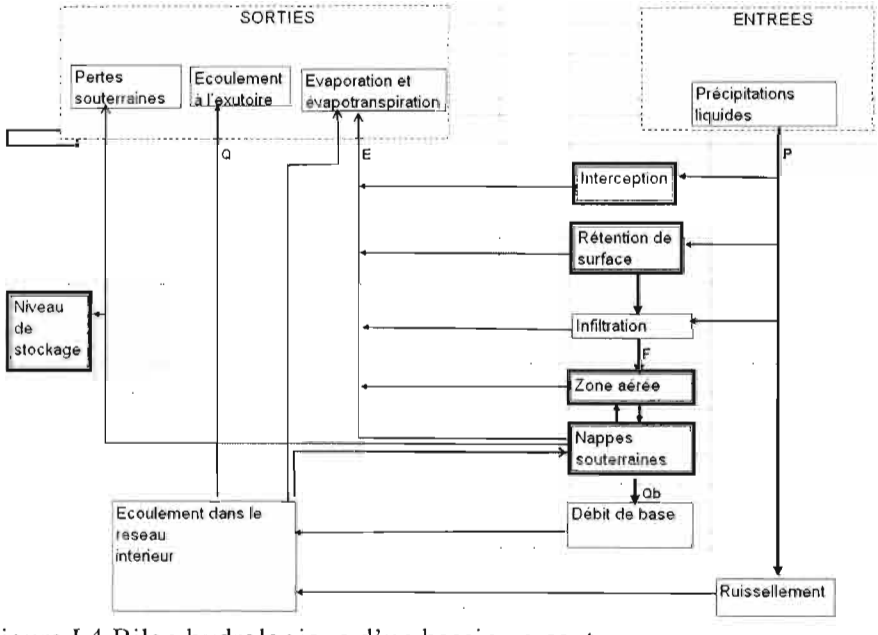


Figure I.4 Bilan hydrologique d'un bassin versant.

I.5. Les ressource en eau du pays et son utilisation

❖ Ressources en eau

Les ressources en eau au Burundi sont, dans l'ensemble, abondantes grâce à une bonne pluviosité et à la rétention d'eau par les marais et les lacs, en particulier le Lac Tanganyika. Les pluies apportent par an 31 900 millions de m3 dont 21 850 quittent le pays par évaporation. Les débits importés par les cours d'eau ajoutent 8 170 millions de m^3/an, soit 259 m3/sec. Le lac Tanganyika est l'une des plus grandes réserves d'eau douce du monde et contient environ 20 000 km^3 d'eau.

Le bilan hydrique par bassin versant, fait ressortir un débit moyen des cours de 319 m^3/sec soit un volume annuel de 10 061 X 106 m^3.

Le total du débit de base pour une année moyenne estimée en calculant la moyenne des minima mensuels s'élève à 237 m^3/sec, tandis que le débit garanti est de 197 m^3/sec.

La répartition des ressources en eau n'est pas optimale ni dans l'espace ni dans le temps. Les périphéries de basses altitudes sont plus arides et présentent une saison sèche plus longue. Les régions de la Crête Congo-Nil sont, non seulement les plus arrosées, mais en même temps les pertes dues à l'évapotranspiration sont limitées par les températures relativement basses.

D'une manière générale, le pays est doté d'un réseau hydrographique très dense, notamment dans les plateaux centraux où il existe de nombreuses vallées à fond plat souvent mal drainées et traversées par des rivières.

Toutes les ressources en eau du pays proviennent des précipitations dont la plus grande quantité (77 pour cent) tombe entre les mois de novembre et avril. En moyenne les précipitations annuelles s'élèvent à 1 274 mm. Ces eaux de pluies alimentent les cours d'eau dont le réseau est dense dans la plupart des régions, à l'exception des plaines de l'Imbo, du Bugesera et d'une partie du Moso. Celles-ci ont peu de sources mais elles sont traversées par des rivières provenant des régions d'altitude où les précipitations sont plus abondantes.

Les trois grands lacs que possède le Burundi sont tous situés aux frontières et partagés avec des pays voisins. Il s'agit du lac Tanganyika, un des plus profonds du monde (1 453 m) et des lacs du nord, Cohoha et Rweru, caractérisés par de faibles profondeurs.

En moyenne, les ressources en eau disponibles sur le territoire national sont estimées à 319 m^3/s ou 10.060 km^3/an. Le débit des cours d'eau frontaliers s'élève à 336 m^3/s ou 10.596 km^3/an. La seule rivière qui importe de l'eau dans le territoire burundais est la rivière Kaburantwa dont le débit s'élève à 4 m^3/s ou 0.126 km^3/an. La quantité d'eau disponible à l'intérieur du pays est donnée dans le tableau ci-dessous

Bassin	Superficie	Débit moyen			Débit de base			Débit garanti sur 95 %		
	Km^2	Km^3/an	m^3/s	$l/s*km^2$	Km^3/an	m^3/s	$l/s*km^2$	Km^3/an	m^3/s	$l/s*km^2$
Nil	13218	4,32	137	10,4	3,09	98	7,4	2,08	66	5
Congo	11817	5,74	182	15,4	4,38	139	11,8	2,87	91	7,7
Total	25035	10,06	312	12,7	7 ,47	237	9 ,5	4,95	157	6,3

Tableau I.4. La quantité d'eau disponible à l'intérieur.
Source : www. Fao.org.

Le débit moyen des cours d'eau (10.06 km^3/an) représente les ressources en eaux superficielles et en eaux souterraines. Il s'agit de la totalité des ressources en eaux internes renouvelables disponibles. Le débit de base est alimenté par le drainage des nappes d'eau souterraines. Pour une année moyenne, le débit de base estimé s'élève à 237 m^3/s ou 7.47 km^3/an, soit 74 pour cent de l'écoulement total. Dans les différents bassins, les débits de base observés oscillent entre 63 et 89 pour cent du débit moyen, en fonction de la capacité de rétention du bassin versant qui dépend notamment de la capacité des aquifères (volume de stockage) et des alluvions des vallées, y compris les marais.

Le débit garanti sur 95 pour cent du temps, estimé à 157 m^3/s ou 4.95 km^3/an, caractérise le minimum des ressources à la fin de la saison sèche. Il est inférieur à la moyenne du mois le plus sec de l'année (en général le mois de septembre), mais toujours supérieur au débit minimum annuel. Le bilan hydrologique d'une année moyenne pour l'ensemble du pays est présenté au tableau ci-dessous, où les précipitations sont égales à la somme de l'évapotranspiration, plus le débit de base et le ruissellement. L'écoulement total (débit de base + ruissellement) est de 319 m^3/s correspondant à une lame de 402 mm ou 32 pour cent des précipitations moyennes (1 274 mm/an).

Précipitations	évapotranspiration	Débit de base	ruissellement
1274 mm	872 mm/an	299 mm/an	103 mm/s
1011 m^3/an	672 m^3/an	237 m^3/an	82 m^3/n
100 %	68 %	23 %	9 %

Tableau I.5. Bilan hydrologique d'une année moyenne
Source : www.fao.org.

Le pays détient un important potentiel en eau de sources. On estime leur nombre à environ 36 000 dont 14 500 sont localisées. Le débit des sources répertoriées (886 000 m^3/jour) permet théoriquement d'approvisionner plus de 40 millions de personnes avec une consommation spécifique de 20 l/jour. Quant aux puits et forages, ils sont au nombre de 491 et se répartissent comme suit: 291 puits, 174 forages et 26 sondages. Ils servent tous à l'alimentation en eau potable.

❖ **Utilisation de l'eau en général dans le pays**

Au Burundi, les ressources en eau restent peu utilisées dans le processus du développement socio-économique du pays.

L'utilisation de l'eau à usage non potable se répartit entre l'agriculture (59,5 %), la pisciculture (0,3 %), l'industrie (0,5 %) et l'hydroélectricité (49,4 %).

L'utilisation de l'eau potable dans les ménages, les édifices publics et l'industrie est faible par rapport à celle utilisée dans l'agriculture.

En milieu urbain, les besoins en eau potable doublent tous les dix ans : 22 millions de m3 en 1990, 40 millions de m3 prévus pour l'an 2000 et 70 millions de m3 pour l'an 2010.

En milieu rural, le taux de croissance des besoins en eau potable est de 58 % tous les dix ans. Ils passent de 170 millions de m3 en 1990, à 293 millions de m3 en l'an 2000, et à 434 millions de m3 en 2010. Il faudrait noter qu'en milieu rural, 51 % de la population s'approvisionnent en eau potable aux sources aménagées, aux bornes fontaines, et une faible proportion aux puits, tandis que 49 % restant puisent naturellement l'eau des rivières et des lacs.

En 2000, les prélèvements d'eau étaient estimés à 288 millions de m^3, dont 200 millions pour l'agriculture (69 pour cent), 22 millions m^3 pour l'élevage (8 pour cent), 49 millions m^3 pour les usages domestiques (17 pour cent) et 17 millions m^3 pour l'industrie (6 pour cent)

❖ **Eaux internationales : les enjeux**

Le Burundi est compris dans les bassins du fleuve Congo (Zaïre) et du Nil. Il est donc membre de l'Initiative du bassin du Nil lancée en 1999 par le Conseil des ministres des ressources hydriques des États du bassin du Nil (connu sous le nom de Nile.COM).

I.5. Le climat du Burundi

Sa position géographique à la charnière de l'Afrique central et oriental, confère au Burundi un climat tropical mais tempéré du point de vue thermique. Le Burundi se caractérise par l'alternance des saisons : saison sèche et saison des pluies, la longueur de la saison sèche apparaît comme le critère majeur de la différenciation régionale des climats.

La climatologie du Burundi s'appuie sur les données météorologiques des stations réparties sur tout le territoire mais de façon irrégulière. Les renseignements fournis sont en général assez succincts car la majorité des stations n'est pas équipée de pluviomètres et thermomètres donnant des indications élémentaires.

I.5.1. Les éléments du climat

A. Les températures

Les températures sont à caractère équatorial mais tempérées par l'altitude. Les températures moyennes évoluent entre 23° c pour la valeur la plus élevée, enregistrée à Nyakagunda au Nord de l'Imbo, à une altitude de 966 m et 14° c à Gisozi, sur la crête Zaire-Nil à 2078 m. Leur répartition se claque directement sur celle des zones altitudinales. L'Imbo est le secteur le plus chaud avec les températures supérieures à 23° c pour les altitudes comprises entre 774 et 1000 m. Les basses pentes de Mirwa, le Kumoso et les dépressions du nord enregistrent des températures variant entre 20 et 30° c. Tout le reste du pays se caractérise par des températures souvent inférieures à 15° c.

B. Les pluies et humidité atmosphérique.

Au point de vue, le Burundi apparaît comme région très contrastée, comprenant des secteurs très arrosés sur la crête Zaire-Nil et des secteurs très secs, comprenant la basse plaine de la Rusizi, la région des Lacs Cohoha et Rweru. Malgré une altitude équatoriale, les pluies ne tombent pas toute l'année et une saison sèche se marque nettement. La répartition des précipitations s'explique par la position en altitude mais aussi par l'exposition aux vents pluvieux.

I.5.2. Données météorologiques en rapport avec la commune GIHANGA

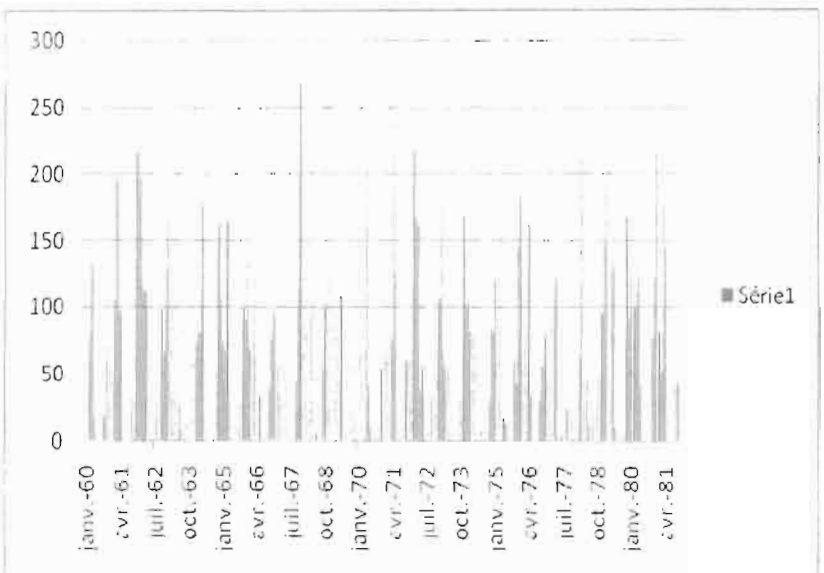
Les stations climatologiques de la région de l'Imbo nous paraissent être celles dont les publications climatiques sont les plus cohérentes permettant de caractériser la commune GIHANGA. Les tableaux en annexe nous montrent les différentes stations de la région de l'Imbo.

Les différents graphiques qui suivent montrent la variation des précipitations dans ces différentes stations, les maximas annuels, ainsi que les moyennes annuelles.

En abscisses, nous avons les mois et en ordonnées nous avons les précipitations

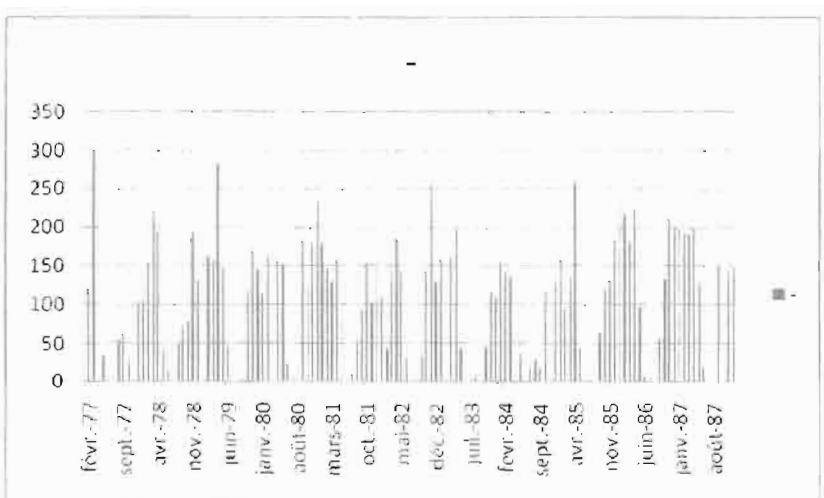
Représentation graphique des précipitations relevées à la station de :
(En abscisses, les mois et en ordonnées : les précipitations)

1. RANDA



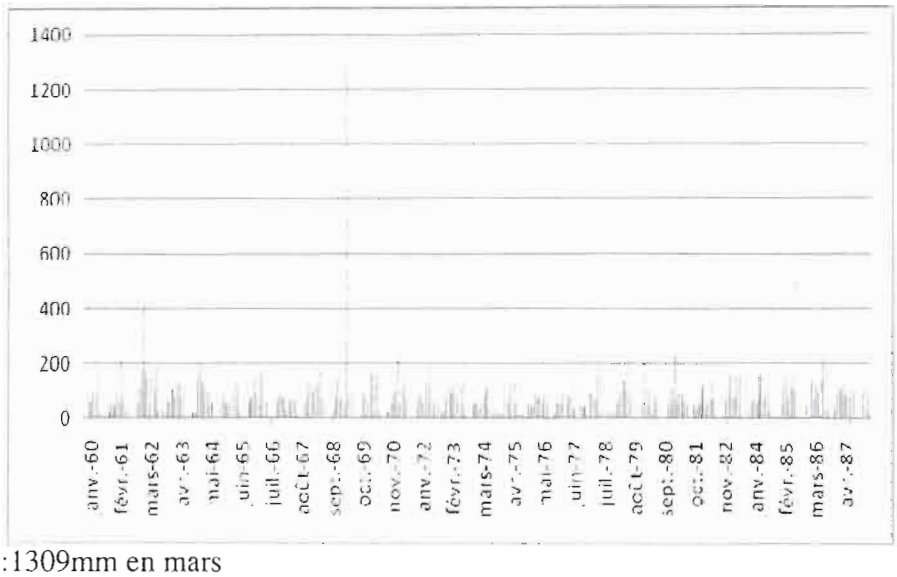
Max : 267.5mm(en nov)
Moyenne : 84.18mm
Figure I.5.Représentation graphique des précipitations relevées à la station de Randa

2. MUZINDA



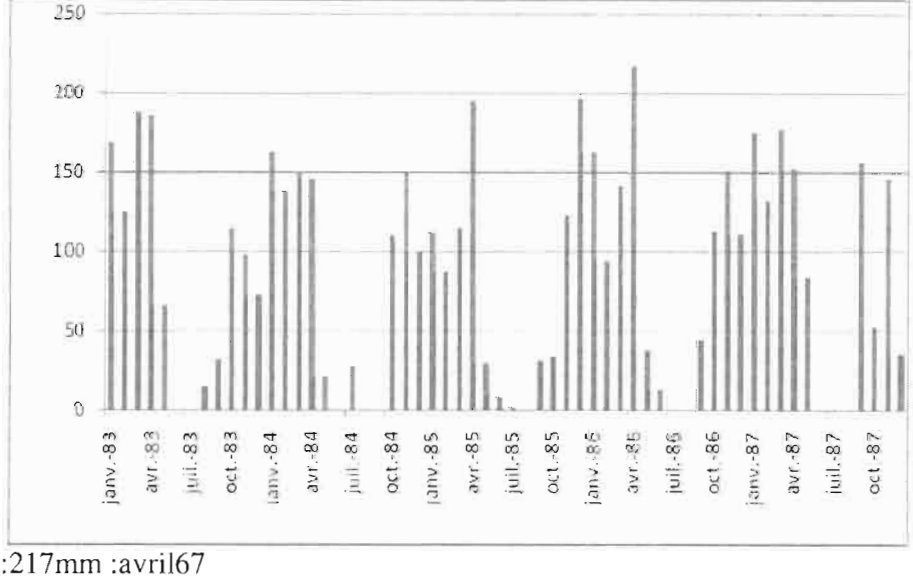
Max :301mm,Mars 1977
Moyenne : 13968,2mm
Figure.I.6 .Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Muzinda

2. BUJUMBURA-AEROPORT



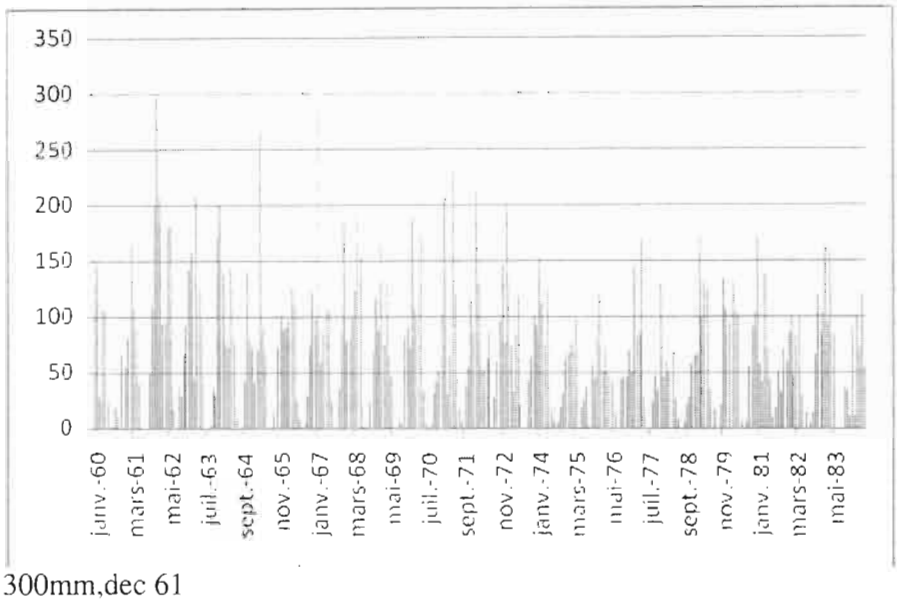
Max :1309mm en mars
Moyenne :211,6mm
Figure I.7. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Bujumbura-aéroport

4. BUJUMBURA-INSTITUT PEDAGOGIQUE



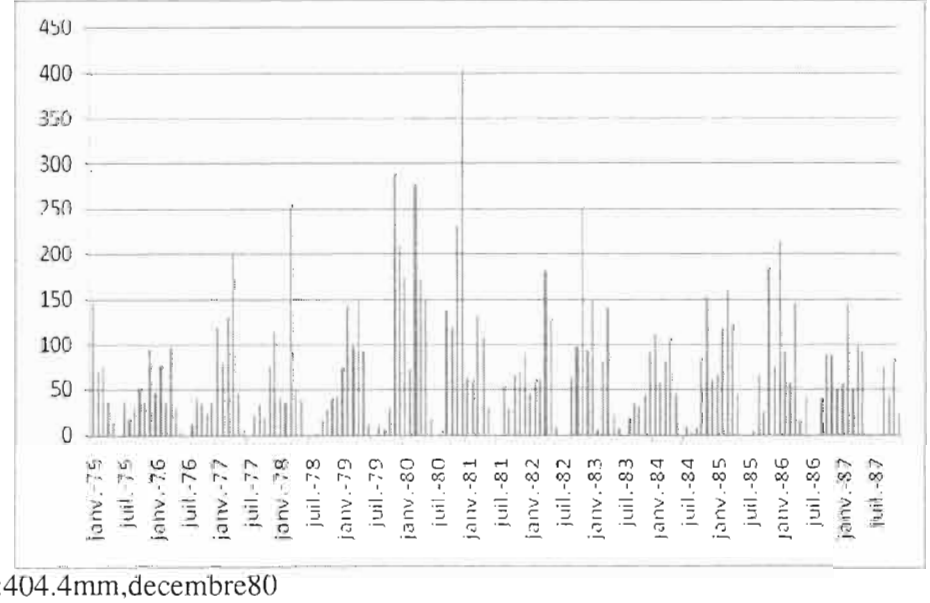
Max :217mm :avril67
Moyenne :86.5mm
Figure I.8. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Bujumbura-Institut pédagogique

5.GIHANGA



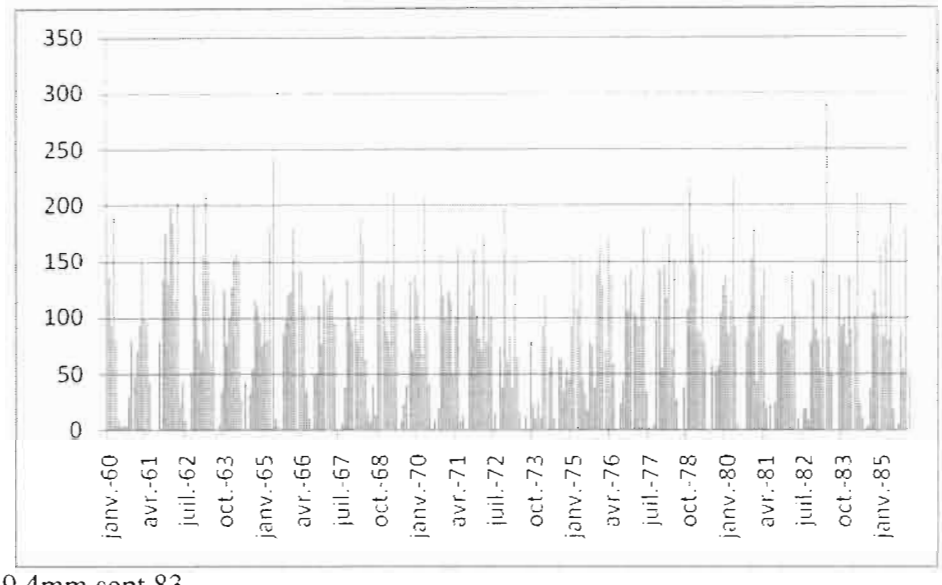
Max :300mm,dec 61
Moyenne :70.9mm
Figure I.9. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Gihanga

6.RUKOKO



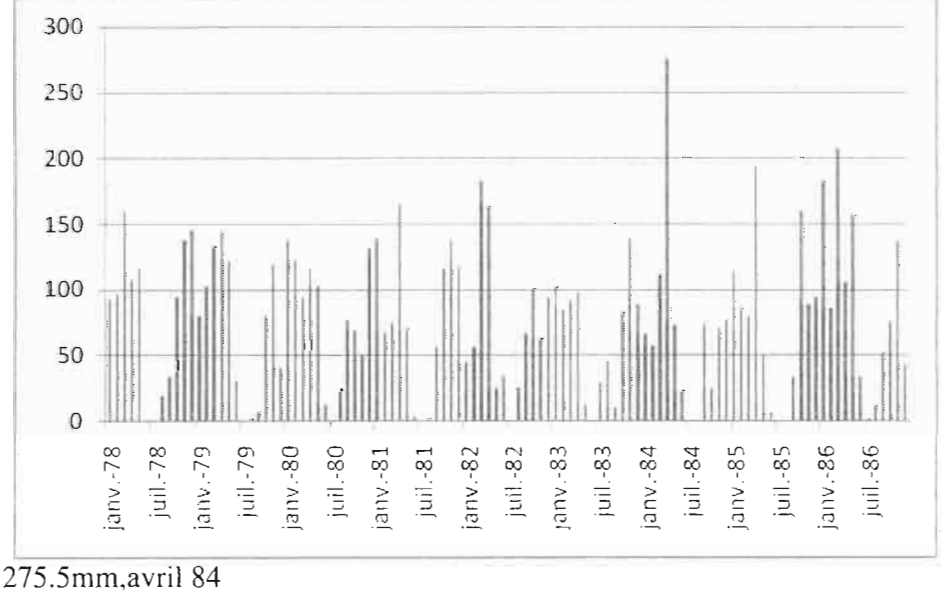
Max :404.4mm,decembre80
Moyenne :136.9m
Figure I.10. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Rukoko

7.NYAKAGUNDA



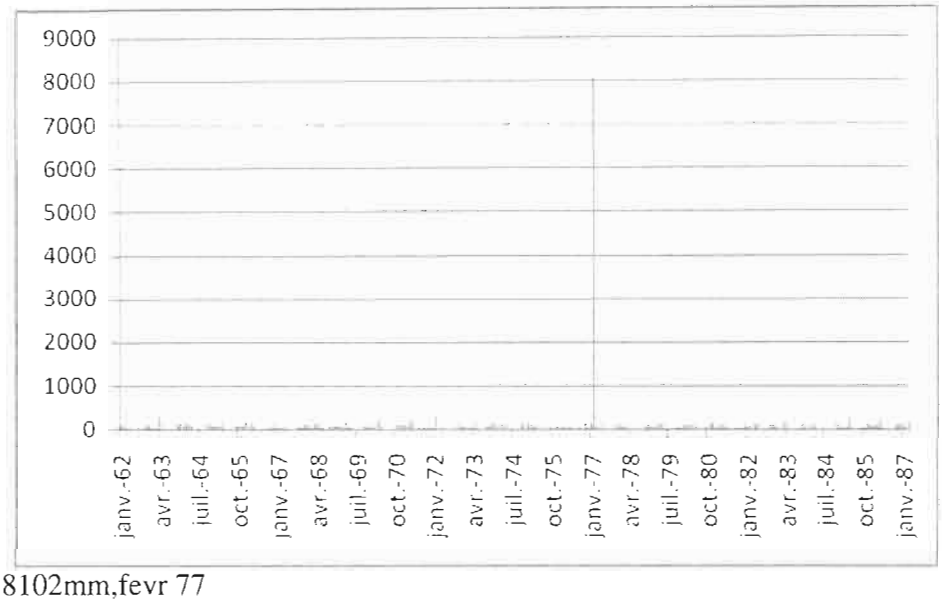
Max :289.4mm,sept 83
Moyenne :82.4mm
Figure I.11. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Nyakagunda

8.MPARAMBO



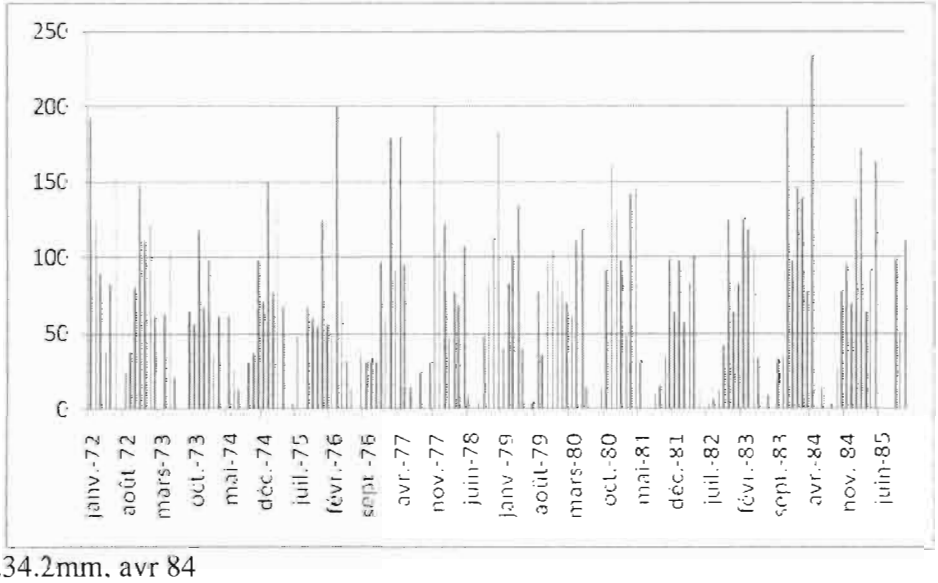
Max :275.5mm,avril 84
Moyenne :80.67mm
Figure I.12. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Mparambo

9.CIBITOKE



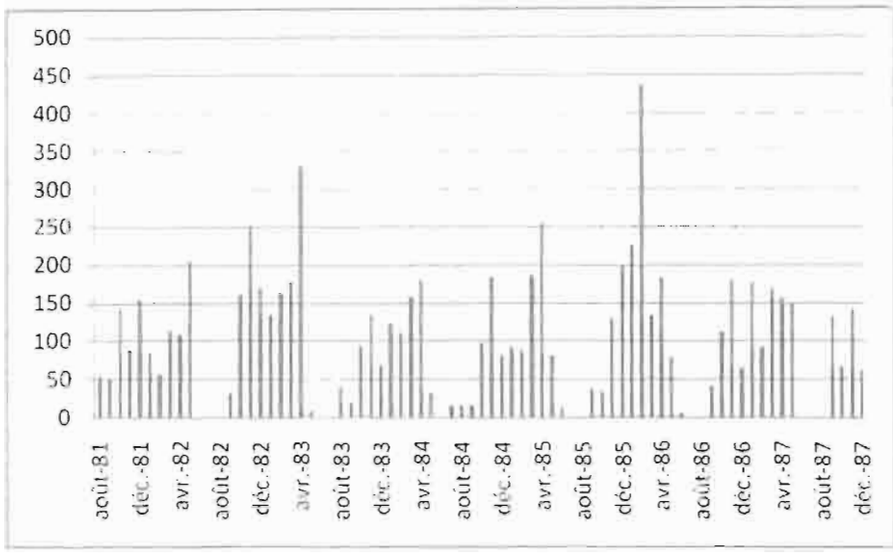
Max :8102mm,fevr 77
Moyenne :105.8mm
Figure I.13. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Cibitoke

10.IMBO SMS



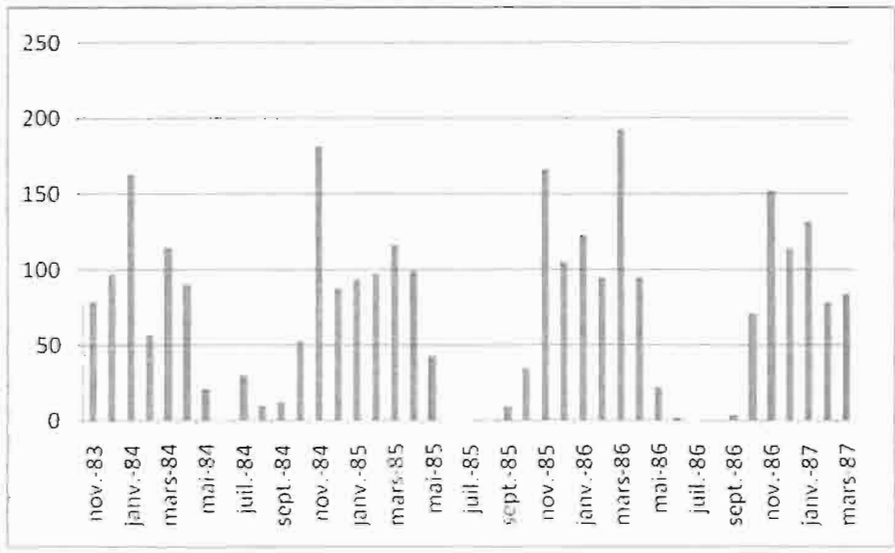
Max : 234.2mm, avr 84
Moyenne : 68,16mm
Figure I.14. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station Imbo Sms

11. MPANDA



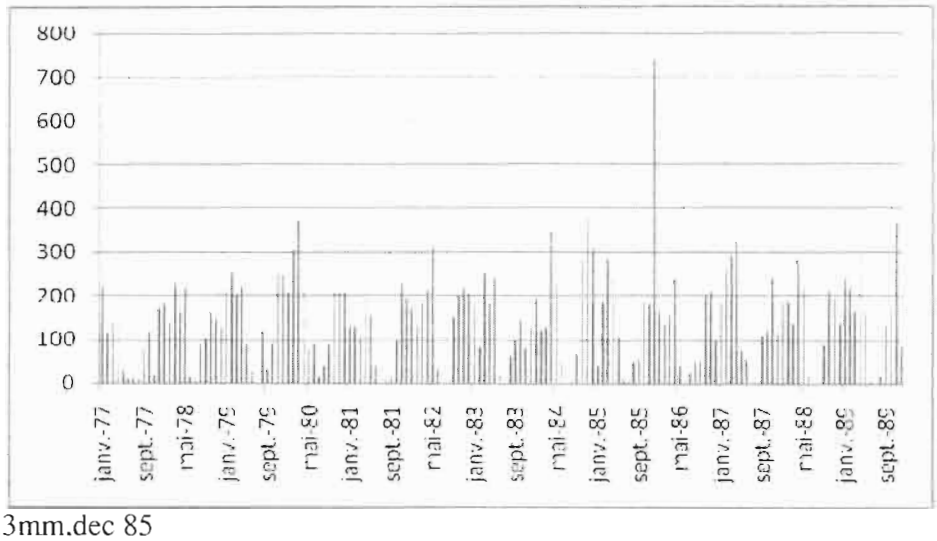
Max :436.1mm,fevr86
Moyenne :93.7mm
Figure.I.15. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Mpanda

12. MARAMVYA



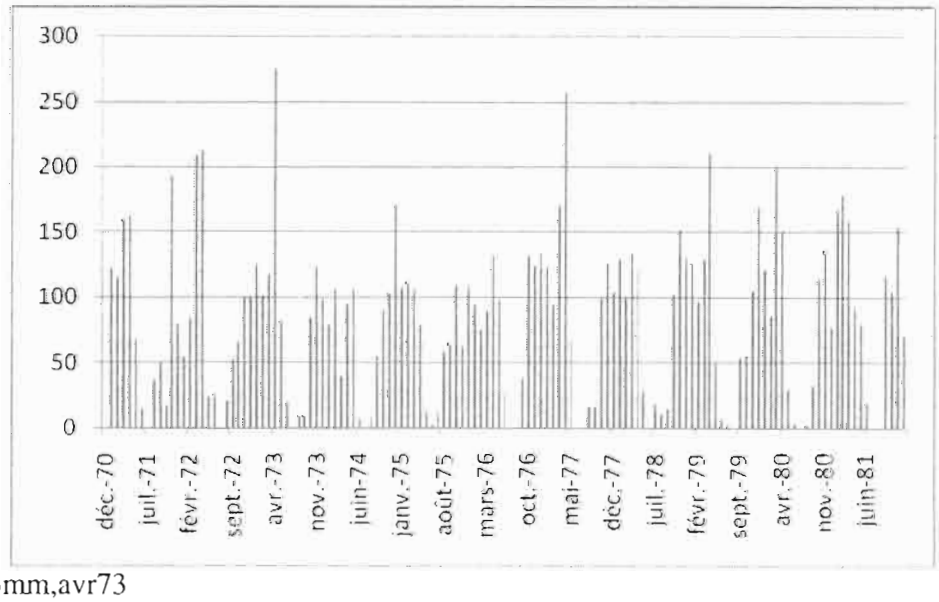
Max :192.2mm,mars 86
Moyenne :139.4mm.
Figure.I.16 Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Maramvya

13.MUSIGATI



Max :737.3mm.dec 85
Moyenne :151.1mm
Figure.I.17. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de Musigati

14.KIVOGA



Max :274.3mm,avr73
Moyenne :86.04mm
Figure I.18. Représentation graphique des précipitations relevées sur la station de kivoga

Le tableau suivant nous montre les différentes stations de la région de l'Imbo avec : Alt. : altitude en m ; N : nombre d'années d'observations complètes ; MS : moyenne du nombre de mois secs (P<500mm) ; P-moy : moyenne de la précipitation totale annuelle par une année en mm).

Différentes stations dans la région de l'IMBO

Stations	Altitude(m)H	Nombre d'années d'observation complète	Moyenne du nombre de mois Secs	précipitations-moyennes
*Bujumbura Aéroport	783	28	4,25	846,1
Bujumbura Institut pédagogique.	905	5	4,6	1038,8
Bujumbura ville	785	22	3,86	964
Cibitoke CFR	930	25	3,64	944,1
*gihanga	815	25	4,48	857,6
*Imbo-SEMS	820	15	4,69	793
Kabezi	867	23	3,96	886
Kivoga	877	21	3,71	1040,7
Maramvya	785	7	4,43	827,7
Mparambo	887	26	3,59	936,9
*Murago	854	24	3,67	1016,1
Nyakagunda	954	26	3,69	994,9
Nyanza Lac Proj.	792	15	4,12	1209,7
*Randa	860	21	4,27	1024,0
*rukoko	790	13	5,08	827
Rumonge	785	26	3,88	1115,4

Les (*) stations sont celles proches à notre milieu d'étude.

Tableau I.6. Différentes stations de la région de l'Imbo.

CHAP. II : ANALYSES HYDROLOGIQUES ET GEOLOGIQUES DU SOL

II.1. Introduction

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant (système hydrologique) s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin versant face à une sollicitation (la précipitation). Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité de l'eau qui s'écoule à l'exutoire du système.

La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation est caractérise par la forme du bassin versant, la nature géologique du sol et l'intensité de la précipitation qui le sollicite.

II.2. Aspect général du relief.

En grande ligne, le relief du Burundi se subdivise en quatre grandes zones :

-La crête Congo-Nil :

C'est une chaîne de montagnes qui traverse le pays du Sud au Nord, plus ou moins parallèle au Lac Tanganyika et la Rusizi; elle se prolonge à travers le Rwanda. Au Sud, l'altitude de la crête diminue fortement et croît vers le Nord.

-Le haut plateau central :

A l'Est de la crête, le relief décroît petit à petit par gradins successifs. Ces régions se représentent sous forme des hauts plateaux entaillés par réseau très dense de petites rivières. Le haut plateau s'étale dans les dépressions dont le fond est occupé par les grandes rivières de l'Est : Malagarazi, Ruvubu et Kagera.

-Les dépressions de l'Est :

On distingue :
1° Au Nord-Est, la dépression de Bugesera autour du Lac Cohoha, Rwihinda et Kanzigiri
2° Au Centre, la dépression de la vallée de la Ruvubu.
3° Au Sud-Est, la dépression de la Malagarazi et la Rumpurwe.

L'altitude de toutes ces dépressions varie entre 1000 et 1500 m.

-Les plaines de l'Ouest :

Contrairement au versant Est, le versant Ouest de la crête descend brusquement du fossé d'effondrement, dont la partie la plus basse est occupée par le Lac et les plaines suivantes :

1° La plaine de la Rusizi qui occupe le prolongement du nord du Lac Tanganyika. Son altitude varie entre 775 m du Sud et 1 100 m au Nord. Elle s'étend environ sur 80 Km du Nord et au Sud et 20 à 30 de l'Est à l'Ouest.
2° Les plaines riveraines
Les rives du Lac sont formées des plaines étroites qui s'élargissent considérablement à Rumonge et Nyanza-lac. L'altitude de ces plaines varie entre 775 à 900 m.

II.3. Impact du climat sur l'hydrologie

C'est le cadre du climat qu'impose, principalement à travers précipitations et températures, les modalités de l'hydrologie et dynamique fluviale. Le découpage climatique du globe domine par conséquent le découpage hydrologique des continents. La climatologie des régions polaires, présentée en premier, sera pourtant, et nécessairement seule. C'est que le froid interdit tout écoulement liquide, sauf aux limites (toundra) où intervient des crues d'eaux exogènes. Climatologie, hydrologie et dynamique fluviale des régions tempérées viendront ensuite l'ensemble de la série sera clos par l'étude de la climatologie puis de l'hydrologie et dynamique fluviale des régions chaudes.

Les données climatiques jouent, en effet, un rôle fondamental par rapport aux autres facteurs géologiques de l'écoulement. Les facteurs morphologiques, lithologiques, pédologiques, voire biogéologique, sont propres à chaque bassin fluvial, alors que les facteurs climatiques règnent sur un grand nombre de bassins d'un même climat.

II.4. Système de collecte des eaux de pluie et son utilisation.

La technique de collecte et de stockage des eaux pluviales n'est pas très connue en milieu burundais. Ailleurs, elle date de l'antiquité et a évolué avec le temps. Aujourd'hui est employée comme moyen d'appui dans l'alimentation en eau potable, dans l'agriculture (irrigation), dans l'élevage et dans l'hydro-électrique.

La mise au point d'un moyen adéquat d'y parvenir est notre préoccupation dans ce travail. C'est-à-dire que nous allons essayer de répondre à la fois à une question économique et technique simple tout en garantissant la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Les surfaces intéressantes à la collecte des eaux pluviales sont généralement de trois ordres à savoir :
-La surface naturelle constituée par une roche-mère dénudée et les arbres avec les feuilles larges ;
-La surface aménagée au sol, celui-ci retient particulièrement notre attention ;
-Les toitures des maisons.

II.5.La nature du sol et la végétation.

La plaine de la basse Rusizi dont le bassin versant des présentes études fait parti se caractérise par des conditions édaphiques quelques peu particuliers. Elle renferme une mosaïque de sols résultant de l'évolution pédogéologique. La tendance à l'aridité du climat, l'importance des alluvions ainsi que la médiocrité du couvert végétal expliquent ces divers types des sols.
Dans la commune de GIHANGA, on a un sol argilo-sableux.

La végétation de la basse Rusizi est connue grâce aux travaux successifs de plusieurs botanistes. La plaine de la basse Rusizi était jusqu'à une époque récente couverte par une formation forestière continue. Cette végétation a vite cédé le pas à une formation graminéenne parsemée de bosquets xérophiles et de palmiers hyphaenes.
La régression de cette formation forestière est certainement due à plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci il convient de remarquer les conditions édapho-climatiques particulièrement sévères : pluviosité faible, saison sèche prolongée, pouvoir évaporant et températures élevées, sols

parfois filtrant, insolation intense, vents desséchants, absence presque totale de relief, proximité d'une nappe phréatique, sols inondés pendant la saison des pluies et arides pendant la saison sèche.

La végétation apparaît comme une vaste mosaïque d'association et de groupements en relation directe avec la nature et la structure du substrat qui les supporte. Les formations des savanes herbeuses, plus ou moins pâturées, ont été décrites en plusieurs associations :
-association à Themeda triandra et Bulbine asphodeloïdes.
-association à Brachiara Ruziziennes et sous-association.
-groupement à hyparohenia cymbaria.
-association à Loudetia.

II.6. Le comportement du sol vis-à-vis de l'eau.

II.6.1.Les types de sol

Les sols peuvent être définis comme le résultat des actions du climat sur la roche-mère. Du point de vue pédologique, la classification des sols peut se faire selon des critères chimiques et structurels tout en considérant leur niveau d'évolution. Pour l'agriculture, il s'avère utile de classer les sols cultivables selon des critères d'aptitude à recevoir, emmagasiner, mettre à disposition de la plante, l'eau qui tombe au cours des quelques mois de l'hivernage.

On distingue trois grands types de comportement du sol vis-à-vis de l'eau :

***La structure sableuse**
Elle correspond au sol de type Dior (Sénégal) et elle est définie de façon suivante :
-assemblage de grains de quartz émoussés,
-structure macroscopique lâche ou aérée,
-rapidité de l'infiltration et du drainage, forces de capillarité importantes et agissantes (remontée de l'eau à la surface),
-rétention interstitielle peu importante (capacité de retenir l'eau, s'opposant à la capillarité),
-mise en réserve de l'eau dans les macroporosités.

***La structure argileuse.**
-assemblage de lames argileuses (silicates hydratés) ;
-structure compacte, stratifiée ;
-rétention interstitielle très élevée, « l'eau est piégée dans l'argile » ;
-peu de macroporosités.
Environ les deux tiers de l'eau stockée sont « piégés » dans les interstices.

***La structure sablo-argileuse.**
Elle allie les avantages des deux classes vues précédemment : aération suffisante, donc une bonne infiltration, un excellent drainage : une mise en réserve et équilibrée du point de vue de la disponibilité en eau pour la plante :
-Les sables donnant de l'eau immédiatement disponible,
-Les argiles retenant au maximum l'eau et la libérant lentement.

La représentation schématique des sols
Il s'avère utile de configurer schématiquement les types de sols de la façon suivante : le sol est représenté sous la forme d'un profil vertical schématique représentant :

-La surface du sol,
-La terre cultivable ou le sol proprement dit,
-La roche-mère (hachuré vertical).

Les éléments structuraux figurant les différents types de sol sont représentés de la manière suivante :
-pour les grains de sable : cercles,
-pour les argiles : des bâtonnets horizontaux, ajourés dans leur axe, représentant la capacité de rétention structurelle de l'argile.
L'eau stockée dans le sol sera représentée en formes noircies.

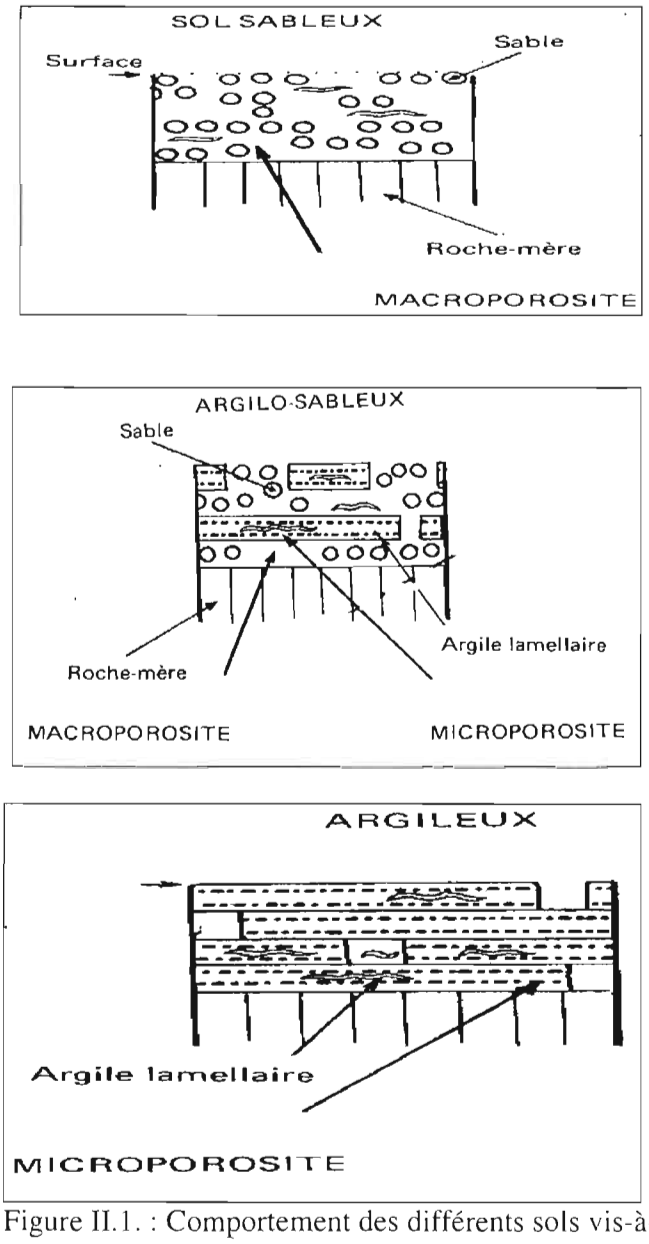
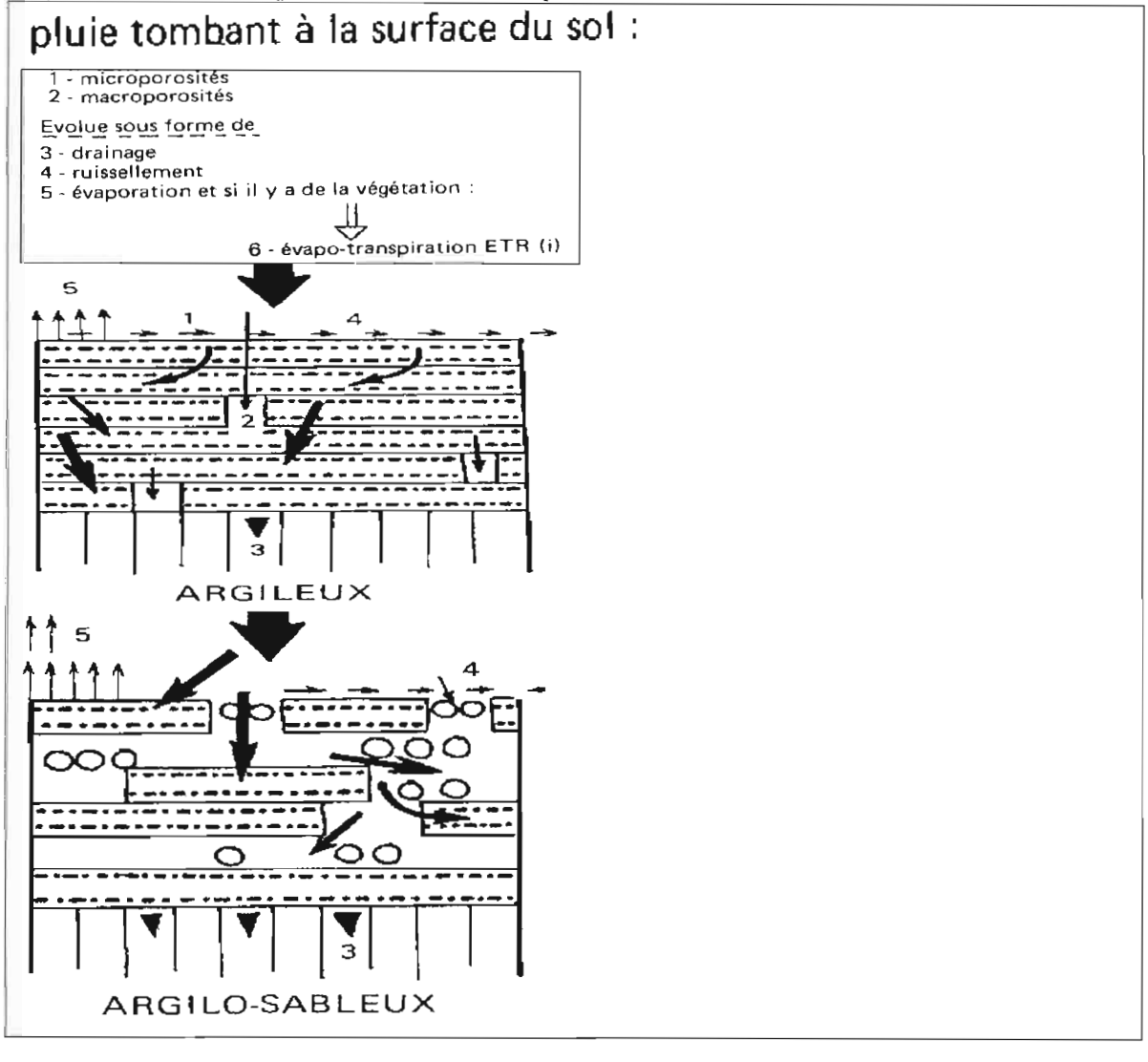


Figure II.1. : Comportement des différents sols vis-à-vis de l'eau

II.6.2. L'évolution de l'eau dans le sol.

Au cours de la saison des pluies, l'humidité pénètre le sol jusqu'à des profondeurs variables selon la structure de celui-ci. Enfin de la saison des pluies, l'assèchement du sol se fera d'autant plus vite que la structure sera sableuse, et que la surface du sol ne sera pas désherbée et protégée.
La figure (II.2) résume l'évolution de l'eau dans le sol.

Deux observations s'imposent :
1° Le ruissellement, en premier lieu, est :
-un gaspillage inacceptable de la pluie rare et mal répartie ;
-une cause de dégâts catastrophiques
2° L'évaporation bien que phénomène naturel, pourrait être diminuée grâce à des méthodes de protection :
-création de brise-vents,
-épandage d'un lit de protection contre l'évaporation.



U. B.

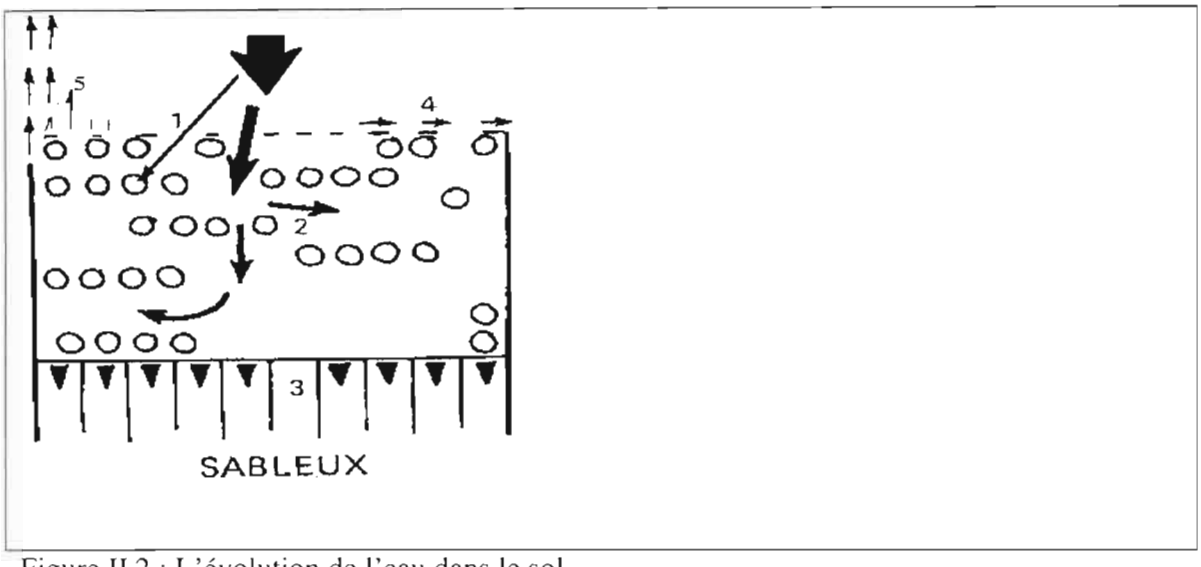


Figure II.2 : L'évolution de l'eau dans le sol.

II.7. Quelques caractéristiques physiographiques et physiques d'un bassin versant

II.7.1.Définition d'un bassin versant

Le bassin versant en un point d'un cours d'eau est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de ce point considéré. Il est délimité par la ligne de partage des eaux (figures II.3).



Figure II.3: Vue en plan et Coupe I-I d'un bassin versant

Compte tenu de la nappe phréatique (Figure II.4 ci dessous), il se peut que la limite d'un bassin versant ne soit pas la ligne de crête séparant deux bassins, mais plutôt celle définie par les hautes élévations de la nappe. Cependant comme cette limite est difficilement repérable, on considère généralement comme bassin versant celui qui est déterminé par le drainage superficiel.

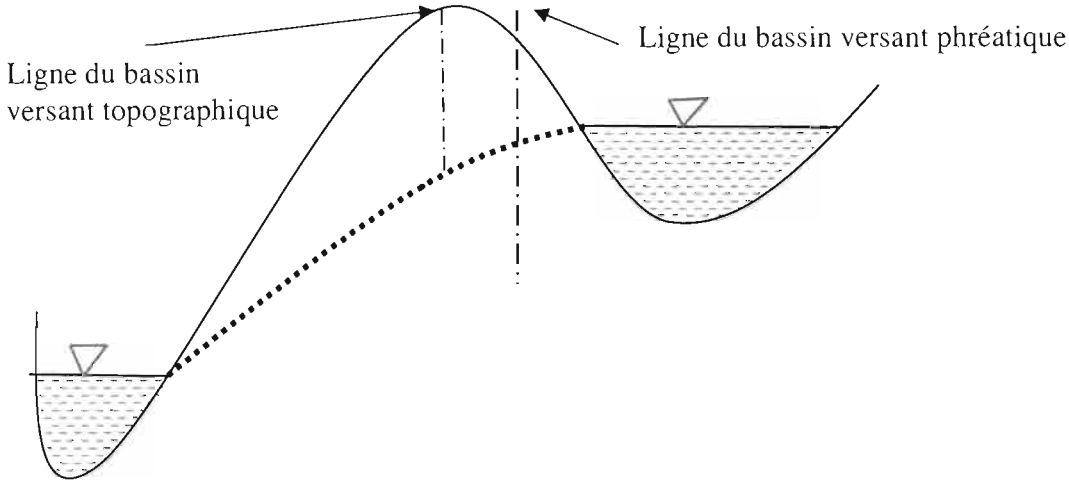


Figure II.4: Limite du bassin versant d'un cours d'eau

L'analyse des phénomènes hydrologiques en général et des composants du cycle hydrologique en particulier est facilitée considérablement par l'adoption d'une unité géographique restreinte ayant certaines caractéristiques communes : le bassin versant.

Le bassin versant en un point (exutoire) ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau est défini comme étant la totalité de la surface topographique drainée par le cours d'eau et ses affluents à l'amont de la dite section ; tous les écoulements prenant naissance à l'intérieur de cette surface doivent traverser la section droite considérée pour poursuivre leur trajet vers l'aval.

En fait, le concept du bassin versant est mis en évidence par l'image suivante : une goutte d'eau tombant sur une région particulière (figure II. 4) se met en mouvement par gravité et, si elle n'est pas retenue sur le chemin ou évaporée, elle se rendra jusqu'à un cours d'eau, lac ou une mer. Si, par quelque chemin que ce soit, la goutte se rend jusqu'à l'exutoire, l'embouchure du cours d'eau, on dit alors que la région appartient au bassin versant.

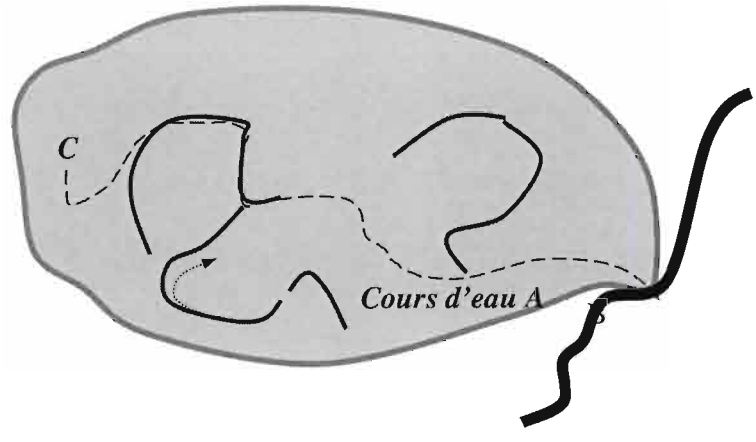


Figure: II .5. Représentation schématique d'un bassin versant d'une façon générale

Ainsi, il est évident que le bassin versant est le lieu des points les plus élevés. Compte tenu de la nappe phréatique (figure II.4), il se peut que la limite d'un bassin versant ne soit pas la ligne de la crête séparant deux bassins, mais plutôt celle définie par les hautes élévations de la nappe. Cependant, comme cette limite est difficilement repérable, on considère généralement comme bassin versant celui qui est déterminé par drainage superficiel

II.7.2. La superficie d'un bassin versant.

La superficie d'un bassin versant est l'aire délimitée par la ligne de partage des eaux par rapport au point d'exutoire considéré. [L. Lamas, 1985]

II.7.3. La forme du bassin versant.

La forme du bassin est la configuration géométrique telle que projetée sur le plan horizontal. Elle affecte directement son temps de réponse c'est-à-dire le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage, et par conséquent le type des hydrogrammes.

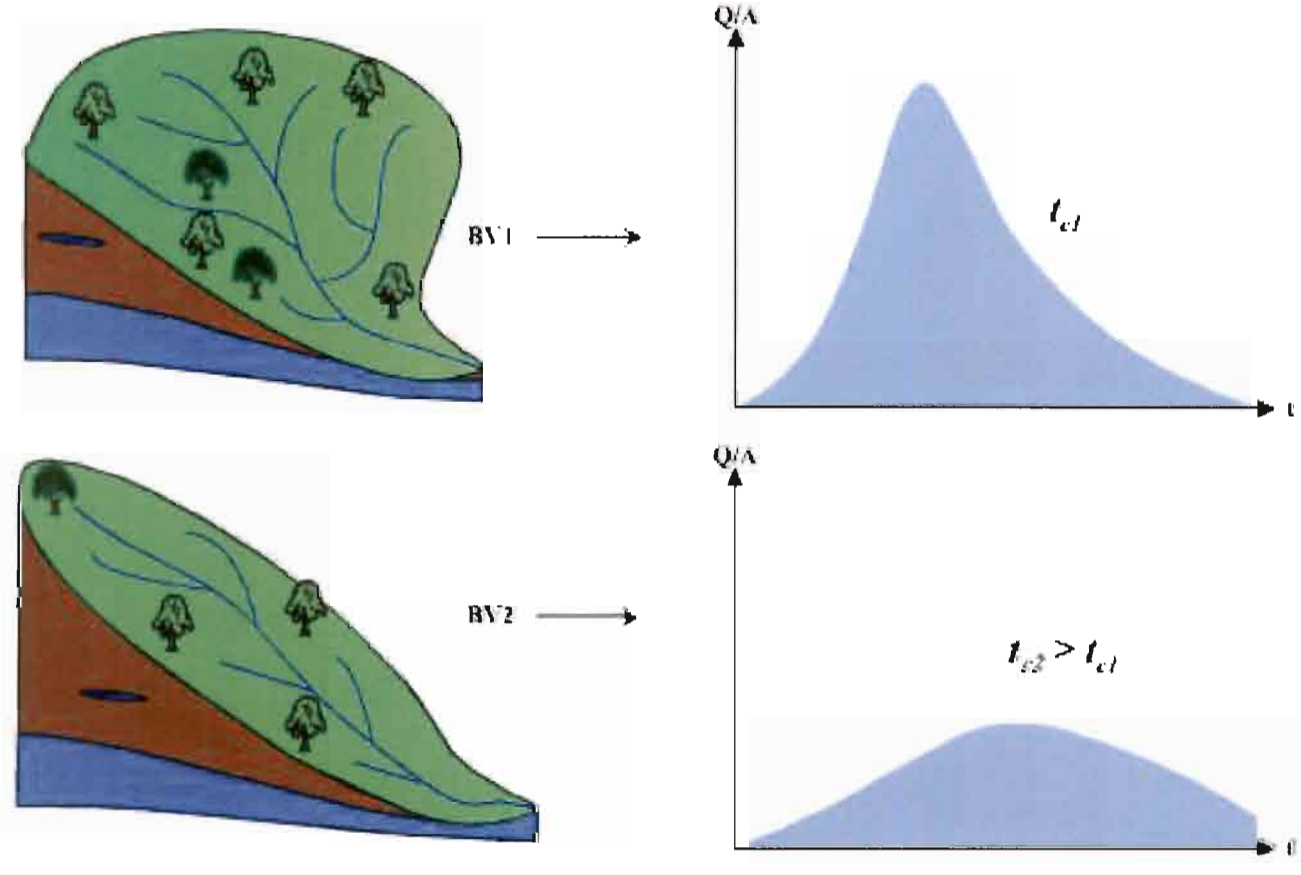


Figure II.6 : La forme du bassin versant et son influence sur l'hydrogramme.

Pour déterminer la forme d'un bassin, on utilise les indices suivants :

II.7.3.1. Coefficient de compacité.

Ce coefficient, appelé coefficient de Gravelius, est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin :

$$K_c = \frac{P}{2\pi R}$$

Avec : $A = \pi R^2$, donc $R = \sqrt{A/\pi}$

Alors,

$$K_c = \frac{P}{2\pi\sqrt{A/\pi}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\pi} \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} = 0{,}28 \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(II.1)}$$

P : périmètre du bassin ;
R : rayon du cercle ;
A : superficie du bassin

II.7.3.2. Coefficient de forme

Ce coefficient est le rapport entre la largeur moyenne (b_m) et la longueur axiale (l_a)

$$K_f = \frac{b_m}{l_a} \qquad \text{(II.2)}$$

II.7.3.3. Elancement

Défini par Schum, l'élancement est le rapport entre le diamètre du cercle ayant la même superficie que le bassin versant et la longueur maximale du bassin. Il fournit des informations sur la compacité du bassin. Ce coefficient varie entre 1 pour les bassins plats et 0,6 pour ceux dont le relief est accentué.

II.7.4. Courbe hypsométrique.

L'influence du relief sur l'hydrogramme est évidente. Une pente plus forte correspond à une durée plus faible de concentration des eaux de ruissellement dans les canaux de drainage et de là dans les affluents et cours principal.

Le relief est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique du bassin versant. Il se construit en portant une altitude donnée en abscisse et en ordonnée la surface du bassin pour laquelle chaque point est à une cote au moins égale à cette altitude.

La courbe hypsométrique fournit beaucoup de renseignements qualitatifs sur l'allure du relief. Une pente forte à l'origine (vers les basses altitudes) indique souvent des plaines ou des pénéplaines ; si la pente très forte, il y a de chances pour qu'on ait de vastes zones d'inondations. Une pente très faible dans la même région révèle au contraire une vallée encaissée. Une pente forte dans le milieu ou dans les hautes altitudes indique probablement un grand plateau [ESKENAZI, 1991].

II.7.5. Le coefficient de cultivabilité.

Le coefficient de cultivabilité est le quotient de la surface cultivable et la surface totale du bassin. On l'exprime en pourcentage et on le note K.

(II.3)

$$K=\frac{\alpha}{A}*100\%$$

Où :

α : surface cultivable

A : surface totale du bassin

Notons que les forêts et les cultures diminuent la vitesse de ruissellement et ainsi facilite l'infiltration de l'eau dans le sol. Elles protègent le sol contre l'érosion [L. LAMAS, 1985]

II.7.6. Notion de rectangle équivalent.

Afin de pouvoir comparer le comportement hydrologique de deux bassins versant, on utilisela notion du rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius. Il s'agit d'une transformation purement géométrique en vertu de laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie. De cette façon, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits côtés.

Soit l et L les côtés du rectangle, P le périmètre du bassin et A la surface.

Alors, $P=2(l+L)=\frac{K_c\sqrt{A}}{0,28}$,

Avec $l*L=A$

En résolvant le système des deux équations précédentes, on trouve :

$$L=\frac{K_c\sqrt{A}}{1,12}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{K_c}\right)^2}\right]$$

(II.4)

$$l=\frac{K_c\sqrt{A}}{1,12}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{K_c}\right)^2}\right]$$

(II.5)

Pour que cette représentation soit possible, la condition nécessaire est : $1,12\leq K_c$

II.7.7. Pente moyenne

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

$$I_{moy}=\frac{l_i h}{A},$$

(II.6)

Où l_t : somme des longueur de toutes les courbes de niveau ;
h : intervalle entre deux courbes de niveau consécutives (équidistante) ;
A : superficie totale du bassin.

On démontre que cette pente moyenne est donnée par :

(II .7)

$$I=\frac{\Delta Z}{L}$$

Où ΔZ : dénivelée totale ;
L : longueur du rectangle équivalent

II.7.8. Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface :

(II.8)

$$F=\frac{\sum_{1}^{k} N_u}{A} \qquad [km^{-2}]$$

Avec N_u: nombre de canaux d'ordre u;
A : surface du bassin en km^2
k: ordre du bassin versant

II.7.9. Autres caractéristiques d'un bassin versant.

II.7.9.1. perméabilité du sol.

La perméabilité du sol (sable, limon, argile, etc.) peut être mesurée de façon assez précise, soit au laboratoire, soit in situ. En revanche, à l'échelle d'un bassin versant, il est difficile de définir la perméabilité de façon précise, compte tenu de l'hétérogénéité des terrains rencontrés. L'ORSTOM a proposé une classification subjective suivante :

P1 : bassins rigoureusement imperméables, entièrement rocheux ou argileux.
P2 : bassins assez imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins
homogènes presque imperméables.
P3 : bassins assez imperméables comportant des zones perméables d'étendue instable ou
bassins homogènes assez peu perméables.
P4 : bassins peu perméables tels qu'on rencontre en zone de décomposition granitique ou avec
abondance d'arènes.
P5 : bassins perméables-sables ou carapaces latéritiques fissurées.

II.7.9.2.couvert végétal.

Le couvert végétal a une action très importante sur le ruissellement superficiel, le taux d'évaporation, la capacité de rétention du bassin et, de manière générale, sur tout le processus de transformation des pluies en débits. Cependant, il n'est pas possible actuellement de quantifier cette influence.

On se contentera donc de limiter, sur un bassin versant donné, les zones couvertes des forêts et celles qui ne le sont pas. Il faut enfin remarquer que la couverture végétale varie considérablement entre le début et la fin de la saison des pluies en pays tropical.

II.8. Analyse statistique des données pluviométriques.

Il importe de résumer et de coordonner les données pluviométriques en quelques éléments synthétiques en nombre aussi faible que possible, suffisamment maniables pour caractériser une station. L'organisation météorologique mondiale recommande le calcul des « valeurs normales » des précipitations sur une période de 30 ans [Réméniéras, 1986]. Malheureusement dans bien des cas, les mesures ne sont disponibles que sur une dizaine d'années (10, 20 ans).
On est par conséquent obligé de faire une extrapolation sur des siècles sur base d'un échantillon peu représentatif. Le danger est imminent mais différentes méthodes peuvent y suppléer. Pour les bassins versants de GIHANGA, seules les hauteurs mensuelles ont été fournies pour le présent travail. La période d'observation varie de 13 à 28 années pour les différentes stations. Etant donné que le réseau pluviométrique est très faible, il n'est pas possible de faire une moyenne pondérée en fonction de la surface d'influence de chaque pluviomètre [méthode de Thiessen].
-Le coefficient pluviométrique mensuel, défini comme étant le rapport de la moyenne mensuelle sur le module annuel, montre qu'à peu près 20 % de la hauteur pluviométrique annuelle tombe au mois d'Avril. Cette période correspond au passage du Front de Convergence Intertropical sur le BURUNDI. Il s'agit d'un Front de Convergence entre l'alizé de L'Hémisphère Nord dévié vers le sud au passage de l'Equateur et les masses d'air de l'alizé de l'Hémisphère Sud, venant de l'Ouest de l'océan Indien [Casenave-Pierrat, 1979] : les pluies d'Avril sont des pluies de Front.
-Excepté pour la saison sèche et pour les mois de transition entre saison pluvieuse et saison sèche, les moyennes mensuelles sont sensiblement égales aux médianes. Ce qui atteste d'une bonne distribution gaussienne. Un des moyens utilisés pour vérifier si la distribution obéit à une loi est la linéarisation. Les hauteurs pluviométriques en fonction de la probabilité de non dépassement se répartissent suivant une droite bien ajustée.

II.8.1. Importance des données météorologiques.

Notre souci était de faire une étude assez précise et étendue sur l'ensemble du territoire du pays. Nous avons constaté que les variations des précipitations sont souvent considérables d'une région à une autre. Pour cette raison, le sujet serait long et pratiquement irréalisable pour un seul projet d'étude, nous avons alors concentré notre étude sur les bassins versants de GIHANGA.
Afin d'apprécier la régularité et la quantité des précipitations, les données pluviométriques fiables doivent s'étendre sur une période suffisamment longue car les écarts annuels peuvent être importants.

Nous avons alors collecté les données pluviométriques prélevées sur les différentes stations de la région de l'Imbo, tableau (I.6), stations météorologiques proches de notre milieu d'expérimentation pour se rendre compte de l'évolution des précipitations. Ces relevées nous ont permis de déterminer les coefficients de ruissellement.
D'une façon générale, la hauteur totale des précipitations reçues par le bassin versant donne une idée globale de l'état naturel d'humidité du sol et de l'intensité des averses. Il s'agit effectivement d'une idée globale car il faut en outre tenir compte de l'alternance des saisons et donc du nombre total de jours de pluie sur une période considérée.

II.8.2. Conséquence : analyse du ruissellement

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol suivant la pente du terrain. Le ruissellement constitue une part d'eau qui provoque le plus de dégâts vis-à-vis des ouvrages du génie civil et c'est pour cela qu'il intéresse particulièrement les Ingénieurs.

Sous l'effet de la gravité et par suite des propriétés des fluides, les eaux qui tombent à la surface du sol et qui ne sont ni absorbées, ni évaporées se meuvent en suivant les lignes de plus grande pente du sol et tendent à se réunir dans les régions les plus basses.
Les caractéristiques orographiques d'une région déterminent donc complètement le mouvement et la répartition des eaux, c'est-à-dire ses caractéristiques hydrographiques.

Il y a entre les cartes orographiques et hydrographiques d'une région une relation forcée de cause à effet. En conséquence ; toute modifications artificielle ou naturelle de surface du sol influe sur la réponse d'un bassin versant. Il importe de ne jamais négliger ce principe, mais de le considérer en toute circonstance pour éviter les conséquences fâcheuses des modifications.

II.8.2.1. causes du ruissellement.

Les causes du ruissellement peuvent être réparties en deux groupes :
Les causes climatiques :

- -Type de précipitation
- -Intensité de la pluie
- -Durée de la pluie
- -Distribution spatiale
- -Direction de déplacement de l'averse
- -Pluie et humidité aérienne
- -Conditions climatiques (évaporation)
- -Les caractéristiques du bassin versant : vus au point II.7.

II.8.2.2. Les effets du ruissellement

Au début (en amont), les vitesses des eaux sont très faibles et deviennent de plus en plus grandes quand la pente devient plus forte ou que le bassin s'étend (effet quantitatif). Alors, l'érosion commence. C'est-à-dire que la vitesse de l'eau devient suffisante pour que les particules les plus tenues au sol soient entraînées. Ainsi se produisent de petites dépressions dans lesquelles l'eau se concentre.

Au second stade de l'écoulement, l'eau se rassemble en fils ou petits courants dont le mouvement est régi par les lois qui se rapprochent de celles des courants liquides en canaux découverts.

Les effets du ruissellement sont donc d'éroder le sol, par enlèvement des matières dissoutes ou par enlèvement des particules constituantes et par suite de charger l'eau des matières solides. La dégradation des lits et de transport solide peuvent donner lieu à des accidents et dégâts importants en cas de trombes d'eau : obturation des voies de communication, dégâts aux cultures et terrains cultivés etc.
En tout temps, le ruissellement de surface expose les talus en terre meubles à la destruction progressive.

II.8.2.3. L'hydrogramme d'un bassin versant

A. Définition et utilité.

L'hydrogramme d'un bassin versant est une courbe des débits en fonction du temps Q(t). Cette courbe présente de nombreuses fluctuations d'amplitude, de période et de forme. Ces fluctuations sont le reflet d'une relation des facteurs hydrométéorologiques agissant sur le bassin versant.

Pour la mise sur pied de divers projets de constructions hydrauliques, il est nécessaire de prédéterminer la courbe Q(t) à partir de l'hydrogramme i(t) de projet.

B. Représentation d'un hydrogramme type.

Considérons un hydrogramme simple enregistré à une station de relevées après une averse tombée sur un bassin versant. Il présente la forme générale d'une courbe cloche dissymétrique comprenant trois parties :
-La partie correspondant à la montée de la crue appelée courbe de concentration ;
-La zone entourant le sommet ou le maximum appelée « pointe » ;
-La zone afférente à la diminution progressive du débit désignée sous le nom de courbe de décrue.

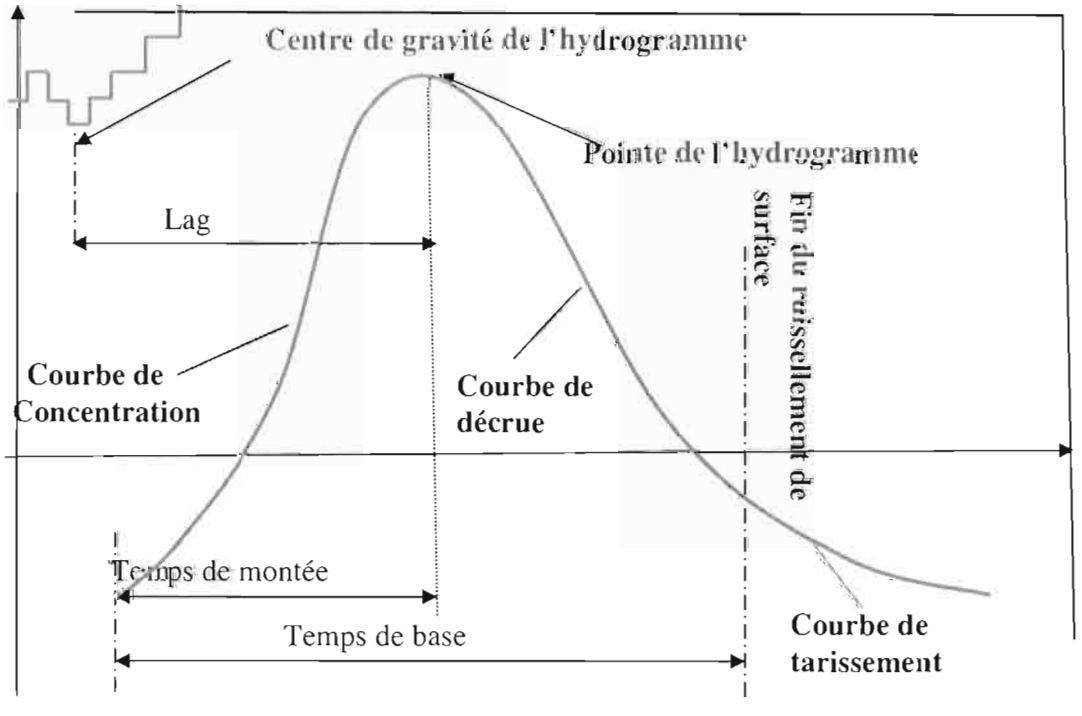


Figure II.7 : forme de l'hydrogramme

On réserve le nom de « courbe de tarissement » la partie de l'hydrogramme figurant la décroissance au bout d'un temps assez long pour que, tout ruissellement en surface ayant cessé, l'exutoire d'un bassin versant ne soit plus alimenté que par les nappes souterraines. L'allure de chacune de ces parties est liée à certaines caractéristiques du bassin versant et de l'averse.

II.8.2.4. Coefficient de ruissellement.

Le coefficient de ruissellement se définit comme le rapport du volume d'eau qui ruisselle au volume d'eau tombée sur bassin. Donc, il est compris entre 0 et 1. Il permet de tenir compte globalement des pertes du ruissellement qui se composent de :
-l'évaporation ;
-l'infiltration ;
-le stockage dépressionnaire ;

Le coefficient volumétrique de ruissellement varie en fonction :
-de l'occupation du sol ;
-du relief ;
-de la nature du sol ;
-de la durée de l'averse ; etc.

Des expériences ont été réalisées dans le but de déterminer de coefficient. Les valeurs du tableau (II.1) [R. BOURRIER, 1997] tiennent compte de l'occupation du sol, du relief et de la nature du terrain.

Occupation des sols	Morphologie	Pente (%)	Terrains sableux à crayeux	Terrains limoneux argileux	Limons et argiles compacts
Bois	Plat Moyen Ondulé	<1 1 à5 >5	0,001 0,03 0,05	0,01 0,1 0,15	0,06 0,15 0,2
Pâturage	Plat Moyen Ondulé	1 1à5 >5	0,02 0,08 0,01	0,05 0,25 0,35	0,1 0,2 0,3
Culture	Plat Moyen Ondulé	1 1à5 >5	0,05 0,12 0,15	0,1 0,25 0,35	0,15 0,35 0,45
Village	Plat Moyen Ondulé	1 1à5 >5	0,15 0,25 0 ,35	0,2 0,3 0,45	0,25 0,35 0,5
Villes moyennes (espaces libres)	Plat Moyen ondulé	1 1à5 >5	0,3 0,4 0,35	0,4 0,5 0,6	0,5 0,6 0,7

Tableau II.1 : Coefficient volumétrique de ruissellement

L'application des modèles déterministes comme la formule de SCHAAKE, GEYEZ et KNAP utilisée avec le modèle rationnelle aux USA aboutit à la formule suivante en tenant compte des paramètres d'imperméabilité et de pente :

$$C=0,14+0,64\frac{A_{imp}}{A_{tot}}+5I_{moy} \qquad (II.9)$$

Où C : coefficient volumétrique de ruissellement ;
A_{imp} : surface imperméable ;
A_{tot} : surface totale.

Le coefficient de ruissellement varie avec la durée de l'averse : la saturation des sols réduit la capacité d'infiltration du terrain. De ce fait, le coefficient de ruissellement dépend aussi de l'intensité des précipitations.

La conduite de nombreuses études hydrologiques avec des mesures in situ a conduit à la formule suivante [R. BOURRIER, 1997] :

$$C=\frac{t}{1+t}\tau+\mu\frac{t}{100+t}(1-\tau) \qquad (II.10)$$

Les valeurs de projet de μ sont données dans le tableau (II.2) :

Caractéristiques du bassin versant	μ
Terrains perméables peu pentus (1 à 3 %)	0,1
Terrains argileux (compacts assez imperméables sans végétations Et moyennement pentus ($3 \leq I \leq 6$ %)	0,5
Terrains imperméables assez pentus (>6 %)	0,75
Terrains rocheux, laves, sans végétations et pentus (>6 %)	1,00

Tableau II.2 : Taux de saturation de projet dans la formule de BOURRIER.

CHAP.III : EVALUATION DES DEBITS PLUVIAUX.

III.1. Généralités.

Le calcul des débits d'eaux pluviales à l'exutoire d'un bassin versant fait intervenir un nombre considérable des facteurs : des facteurs climatiques concernant la nature des précipitations, leur distribution dans l'espace, leur durée, la direction de leur déplacement, l'humidité initiale, etc. ; des facteurs physiographiques concernant les dimensions du bassin versant, sa forme, son orientation, la distribution de ses pentes superficielles, la densité de son réseau hydrographique, l'utilisation, la couverture et la nature du sol etc. ; des facteurs physiques concernant les modes d'écoulement des eaux dans le réseau de drainage naturel ou artificiel, les dimensions des chenaux, leurs formes, pentes, rugosités, capacité, etc. Les processus physiques de la transformation de la pluie en débit sont en ordre particulièrement complexes et ne peuvent être décrits par la théorie très générale intégrant la totalité de ces facteurs. Il est donc délicat de réaliser une analyse hiérarchique de leurs influences sur les débits afin de ne retenir que les plus importants. L'utilisation des méthodes statistiques ne serait être plus efficace. Elle nécessite un nombre considérable d'observations.

Ces difficultés d'analyse ont conduit les chercheurs et Ingénieurs à suivre deux voies principales dans l'élaboration des formules de calcul des débits : la première, fondée sur l'exploitation des données observées, souvent difficilement extrapolables lors de leur domaine expérimental d'ajustement. La seconde, fondée sur des théories simplifiées de la transformation de la pluie en débit a conduit à un ensemble de formules plus générales, d'aspect parfois différent, mais résultat d'une même analyse des phénomènes. Elles constituent le groupe des formules « rationnelles ».

III.2. Construction d'un réseau d'isochrones.

III.2.1. Définition et utilité.

L'isochrone est une ligne, lieu géométrique des points tels que le temps de parcours d'une goutte d'eau depuis un de ses points jusqu'à l'exutoire est le même.

La construction du réseau d'isochrones d'un bassin versant est nécessaire pour comprendre son comportement hydrologique général et plus particulièrement pour savoir l'importance relative de chacun de ses sous bassins dans la formation de l'hydrogramme afférent à une averse donnée.

III.2.2. méthode utilisée.

Le tracé d'un réseau d'isochrones est une opération longue et en général peu précise quand les données topographiques du terrain ne sont pas bien détaillées et précise. Voici une méthode qui donne des résultats satisfaisants : on commence par diviser le réseau hydrographique en segments de longueur constante à partir de l'exutoire jusqu'à la partie amont des plus petits tributaires. Après numérotation, chacun des points est caractérisé par trois paramètres :
-distance à l'exutoire ;
-élévation relative ;
-temps de parcours de l'eau.

Ce n'est que ce dernier paramètre qui apparaît sur la carte du bassin. Le temps de parcours de l'eau du point i jusqu'à l'exutoire est :

$$Ti=\frac{d_i}{v_{moy}} \qquad \text{(III.1)}$$

Où

d_i : distance mesurée suivant le trajet des cours d'eau ;

v_{moy} : vitesse moyenne de l'eau pouvant être estimée par la formule Suivante :

$V_{moy}=20\sin^{3/5}\rho_i$

Où $\sin\rho_i \approx tg\,\rho_i=\frac{\Delta H_i}{d_i}$

H_i est la dénivellation entre le point i et l'exutoire.

La deuxième opération consiste à tracer, de façon aléatoire, un certain nombre de points disséminés sur le bassin, et à partir de chacun on dessine le parcours probable de l'eau (c'est-à-dire la ligne de pente maximale) jusqu'à la rencontre du parcours d'eau ou de ses tributaires. On calcule le temps de parcours de ces points.

Une fois que tous les points ont été caractérisés par leur temps de parcours, on peut tracer le réseau isochrone par interpolation. L'isochrone la plus éloignée de l'exutoire représente le temps de réponse du bassin (ou temps de concentration), c'est-à-dire le temps requis pour que toute la surface du bassin contribue à l'écoulement dans l'exutoire, après une averse d'intensité supposée uniforme.

III.2.3. calcul du temps de concentration.

On entend par temps de concentration (t_c), le temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné parvienne jusqu'à l'exutoire. Nous présentons dans cette section les formules les plus utilisées pour le calcul du temps de concentration appelé précisément « temps d'entrée ». Il faut noter que quelque soit le modèle hydrologique prévisionnel utilisé est particulier avec la méthode rationnelle, le calcul du temps de concentration est indispensable car il permet d'évaluer :

-la pluie de projet ;

-les surfaces contributives

La formule de Passini :

$$t_{c=0,108}\frac{\sqrt[3]{AL}}{\sqrt{I}} \qquad \text{(III.2)}$$

La formule de Turazza :

$$t_c=0,127\sqrt{\frac{A}{I}} \qquad \text{(III.3)}$$

Où A : surface du bassin versant en km^2 ;

I : pente moyenne du bassin versant ;

L : longueur du plus grand parcours en Km ;
t_c : temps de concentration.

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

-l'intensité de la pluie ;
-l'occupation du sol ;
-la nature du sol ;
-la pente ;
-la forme du bassin versant.

On peut donner :

Le modèle de SCHAAKE :

$$t_c = \frac{1{,}8\,L^{0.24}}{I^{0.16}\,\tau^{0.26}} \qquad \text{(III.4)}$$

Où t_c (min) : temps de concentration ;
L (m) : distance maximale parcourue par l'eau ;
τ : Taux d'imperméabilisation ;
I : pente moyenne du bassin.

L'équation de SCHAAKE est valable pour des sous bassins versant urbains comportant des rues et des boucles d'égouts situés le long des bordures ou de trottoirs.

Le modèle de la Federal Aviation Agency :

$$t_c = \frac{3{,}26(1{,}1 - C_R)L^{0,5}}{I^{0.55}} \qquad \text{(III.5)}$$

Ce modèle initialement développé pour le drainage des aéroports donne de bons résultats pour les bassins versants. Mais il est difficile de l'appliquer lorsqu'on tient compte de la variation temporelle du coefficient de ruissellement.

Le modèle de Yen et Show :

$$t_c = k\left(\frac{NL}{\sqrt{I}}\right)^{0,6} \qquad \text{(III.6)}$$

Cette formule intègre l'occupation du sol en termes de rugosité (N), la topographie (pente moyenne I, longueur hydraulique L) et l'intensité de la pluie (k). Les valeurs de k et N sont données aux tableaux (III.1 et III.2).

paramètres	Pluie faible	Pluie moyenne	Pluie intense
Intensité de la pluie en mm	<2,0	20÷30	>30
Pour L (m) et t_c en (h)	3,0	2,2	1,4

Tableau III.1 : Valeur du coefficient k dans le modèle de Yen et Chow

Description		Valeur de N		
Surfaces élémentaires		Minimum	moyenne	Maximum
Espaces imperméables	Lisses	0,011	0,013	0,015
	Rugueuses	0,015	0,019	0,023
Espaces verts	Gazon bien entretenu	0,040	0,050	0,060
	Parc boisé	0,060	0,090	0,120

Tableau III.2 : Valeur du coefficient N dans la formule de Yen et Chow.

Le modèle de KERBY :

Ce modèle ; largement appliqué au Québec, permet d'évaluer le temps de concentration pour les surfaces aux caractéristiques variées. Il donne de bons résultats [Brière, 2000] pour les bassins versants urbains où le temps de concentration devient le temps d'entrée :

$$t_c = \left(\frac{2{,}187\, L_n}{\sqrt{I}} \right)^{0.467} \qquad \text{(III.7)}$$

Où t_c : temps de concentration ;

L (m) : longueur hydraulique (n'excédant pas 365 m) ;

n : coefficient de rugosité de Manning donné au tableau III.3 ;

I : pente moyenne.

Surface	n
Surfaces dites imperméables planes	0,02
Surfaces gazonnées planes	0,10
Sol compacté dont la surface est plane	0,10
Surface gazonnée mal entretenue, champ en culture	0,20
Pâturages	0,40
Forêts de feuillus	0,60
Forêts de conifères	0,60
Forêts de feuillus et herbes hautes	0,80

Tableau III.3 : Valeurs du coefficient n dans le modèle de KERBY

Modèle de Mockus

$$t_c = \frac{l^{0.8\left[\frac{1000}{CN} - 9\right]^{1.67}}}{2083 * (100 * I)^{0,5}} \qquad \text{(III.8)}$$

Où t_c : temps de concentration ;

l : longueur hydraulique ;

I : pente moyenne ;

CN : Curve Number

Ce modèle est adapté aux bassins versants variant entre 4 et 1000 ha et qui sont caractérisés par une pente moyenne inférieure à 1 % et par des sols limoneux ou argileux.

Modèle de Kirpich

$$t_c = \frac{0{,}000325 l^{0.77}}{I^{0.385}} \qquad \text{(III.9}$$

Où t_c : temps de concentration ;
l : longueur hydraulique ;
I : pente moyenne.

Ce modèle est adapté aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 et 81 ha, dont les sols sont argileux et dont la pente moyenne et comprise entre 3 et 10 %.

III.3. Calcul des débits de pointe

Il existe un multiple de modèles aussi bien pour les calculs des débits de pointe ou des hydrogrammes de ruissellement. Toutefois, ces formules de conversion pluie-débit sont définies dans un contexte précis et souvent liées à certaines relations qui conditionnent leur généralisation. Nous présentons dans cette section quelques modèles courants utilisés dans le calcul des débits pluviaux maximaux.

III.3.1. Modèles donnant uniquement le débit de pointe.

Ces modèles fournissent, pour un événement pluvieux connu, le débit de pointe à l'exutoire donné mais pas la forme de l'hydrogramme afférant au bassin versant étudié. Parmi ces modèles, on citera :

III.3.1.1. Méthode rationnelle classique.

Principe de la méthode.

La méthode rationnelle peut être utilisée pour les bassins versants dont la taille ne dépasse pas : 259 ha pour Roberson et al ;
5 km^2 pour Viessman et Hammer ;
25 km^2 pour le ministère Québécois du transport (pour le dimensionnement des ponceaux) [G. BRIERRE, 2000].

Fonction	Caractéristiques
Source ⇩ pluie	Atmosphère Distribution spatio-temporelle de la pluie : hyétogramme réel ou synthétique
Transformation ⇩ Bassin versant	Physique Surfaces : -imperméables directement drainées ; -imperméables indirectement drainées ; -perméables non drainées (non raccordées au réseau d'égout ou canaux naturels) ; -perméables drainées Eaux retenues initialement par : -les surfaces perméables ; - dans les affaissements des surfaces dites perméables Conditions antérieures à la pluie Degré d'infiltration des eaux dans le sol au cours de la pluie.
résultats	Hydrogramme de ruissellement à la décharge du bassin versant

Tableau III.4 : Principes de génération d'un hydrogramme de ruissellement

Cette limitation est due au fait que l'on suppose une intensité constante, condition qui ne serait pas réalisée pour des bassins trop étendus. D'autre part, pour un sous bassin versant, la précision d'un nombre plus ou moins élevé (en général selon la taille du sous bassin) de canalisations modifie le temps de concentration et partant l'intensité de la pluie de projet.

L'équation rationnelle classique donne le débit de pointe appelé aussi débit maximal normal. Elle s'écrit :

$$\mathbf{Q_{max}=C_R i A} \qquad \text{(III.10)}$$

Où i : intensité des précipitations (temps de pluie au moins égal au temps de Concentration) ;
A : surface du bassin versant ;
C_R : coefficient de ruissellement moyen donné par :

$$C_R=\frac{\sum_{j=}^{n} C_{R.j} A_j}{\sum_{j=1}^{n} A_j} \qquad \text{(III.11)}$$

Les $C_{R,j}$ sont les coefficients de ruissellement partiels relatifs aux différents états des surfaces A_i, si on exprime i en mm/h et A en ha ; l'équation devient :

$$Q_{max}=\frac{1}{360}C_R iA \qquad \text{(III.12)}$$

Cette méthode peut être appliquée au calcul des eaux pluviales de GIHANGA du fait que la forme de l'hydrogramme n'est pas indispensable ; seuls les débits de pointe sont requis pour le dimensionnement des ouvrages de régulations. La fiabilité du résultat obtenu sera liée à la rigueur suivie dans le choix des coefficients de ruissellement.

III.3.1.2. Méthodes superficielles et linéaires (France)

Formule superficielle (Caquot)

Valable pour de petites zones et homogènes avec des bassins allongement moyen [H. GEURRE et al, 1972], la forme superficielle s'écrit :

$$Q_{max}=aI^{\alpha}C_R^{\beta}A^{\gamma} \qquad \text{(III.13)}$$

Où I : pente moyenne ;
C_R : coefficient de ruissellement ;
A : surface du bassin versant ;
α, β, γ : paramètres de constantes locales à déterminer.

La méthode de Caquot nécessite une expérimentation de longue durée et ne peut être appliquée à l'étage de la conception que si le site à drainer fait partie ou est situé près d'un autre qui est jaugé, condition absente dans notre cas.
Dans la catégorie de formules superficielles se trouvent aussi les formules de Meyer, Possenti etc.

Formule linéaire (Caquot)

$$Q_{max}=\varphi L^{m} \qquad \text{(III.14)}$$

m et φ sont des constantes locales expérimentales à déterminer. Dans cette méthode, le calcul des débits s'effectue en série de l'amont vers l'aval du réseau. La longueur L est déterminée en chaque point où s'effectue le calcul comme étant le développement total des rues canalisées ou non dont les rapports convergent en ce point. Cette formule n'est pas non plus applicable pour les mêmes raisons au début du paragraphe.

III.3.1.3. Modèle de TURRAZA.

Selon cet auteur, le débit est lié au coefficient de ruissellement, à la pente moyenne, à la surface du bassin versant et à l'intensité des précipitations par la formule :

$$Q_{max}=0{,}219C_R H\sqrt{IA} \qquad \text{(III.15)}$$

H (mm) : hauteur des précipitations relevées durant un temps égal au temps de Concentration ;
A (ha) : surface du bassin versant ;
I : pente moyenne.

La hauteur maximale des précipitations (exprimée en mm) est :

$$H=2{,}78.10^{-3}iC_RA \qquad \text{(III.16)}$$

Qui n'est autre que la méthode rationnelle (exceptée la formule très simplifiée pour le calcul du temps de concentration) avec adaptation des unités.

III.3.2. Modèles de calcul de l'hydrogramme de ruissellement

III.3.2.1. La méthode rationnelle avancée.

La méthode rationnelle avancée consiste d'abord à établir des lignes et des surfaces isochrones par maillage du bassin et modélisation des écoulements dans les mailles en tenant compte pour ces dernières de la taille, de l'altitude et du coefficient de ruissellement. Toutefois, en milieu urbain où les différentes constructions peuvent modifier le sens naturel des écoulements, cette modélisation restera elle aussi très approximative.

Pour faire intervenir la forme du bassin versant, nous recourons à la théorie des surfaces contributives définies à partir des isochrones. Ces dernières sont évaluées d'une manière approximative et simplifiée en les assimilant à des secteurs circulaires concentriques à l'exutoire.

Le sous bassin élémentaire est considéré comme élément homogène, c'est-à-dire que l'on ne tient pas compte de la variation spatiale du coefficient de ruissellement à l'intérieur du sous bassin. Le débit Q_j à l'instant t_j donné par :

$$Q_j=\sum_{k=1}^{j} i_k A_m C_{Rm,k} \qquad \text{(III.17)}$$

Avec m =j-k+1

Où m : compteur spatial (sous bassin)
k : compteur temporel (pas de temps)

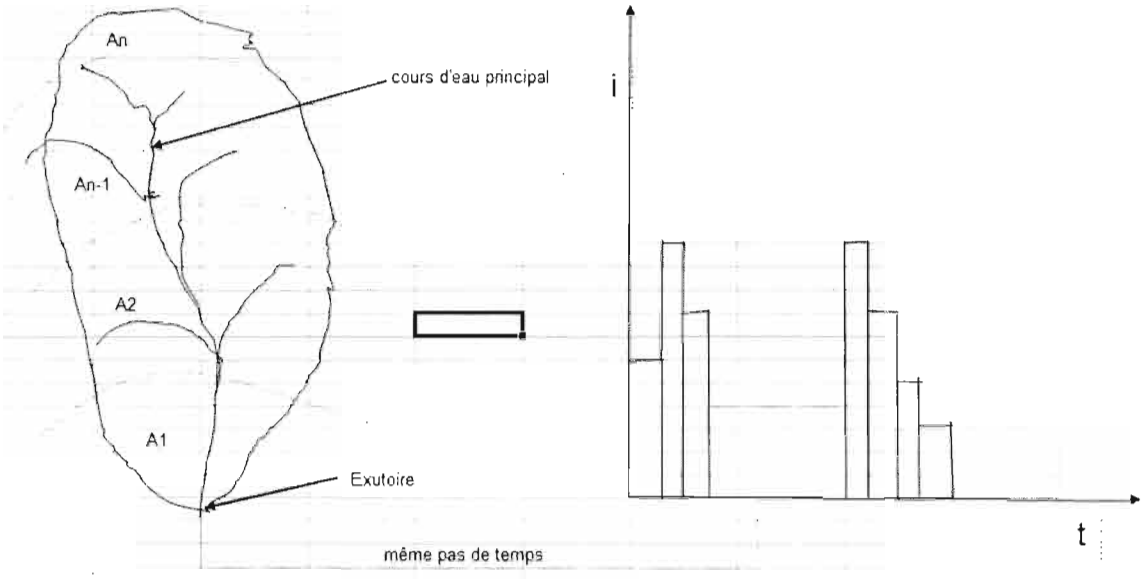


Figure III.1.Maillage d'un bassin versant.

L'intensité i est calculée par la relation I-D-F, le régime pluviométrique caractéristique de la région est donné par la relation I-D-F de

(III.18)

$$i=\frac{aT^{b}}{c+t^{d}}$$

Avec i (mm/h) : intensité moyenne ;
T (années) : période de retour ;
t (min) : temps de pluie (durée de l'averse)
A, b, c, d : paramètres régionaux d'ajustement.

Pour les études faites sur la région de Bujumbura [H. NIYONGABO, 2006], les coefficients a, b, c, d sont donnés dans le tableau (III.5) :

Constantes	a	b	c	d
Valeurs	2845	0,22	24	0,98

Tableau III.5 : Valeurs des paramètres régionaux d'ajustement.

En comparant les deux lois (I-D-F de l'IGEBU et I-D-F en appliquant les paramètres d'ajustement de la région de Bujumbura) ; on constante que les valeurs trouvées sont proches. Les différences sont dues du fait que l'IGEBU traite les données du territoire national (station de Bujumbura Aéroport, Gitega, Gisozi, Bugarama) des pluies maximales journalières (24 heures).

Pas de temps (min)	Loi IGEBU	$i=\frac{2845T^{0.22}}{24+t_c}^{0.98}$
	T=10	T=10
10	124	140
20	110	110
30	89	90
60	61	60
90	51	45
120	40	36
180	28	26
240	23	20
300	19	16

Tableau III.6 : Comparaison des lois I-D-F de l'IGEBU et $i=\frac{2845T^{0.22}}{24+t_c}^{0.98}$

III.3.2.2. Méthode de l'hydrogramme unitaire du SCS.

Principe de la méthode

La méthode des CN est la méthode semi-empirique très utilisée dans le monde particulièrement dans les pays anglo-saxons comme les USA. Elle est basée sur une relation de transport pluie-débit pour le calcul de la pluie nette et hydrogramme unitaire adimensionnel pour la déduction de l'hydrogramme réel de ruissellement.

Hauteur nette

La pluie nette est obtenue à partir de l'hypothèse selon laquelle « à un instant donné, le rapport entre l'infiltration potentielle en débit d'épisode (déficit potentiel maximal D_p) est «égal au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée p ».

La méthode tient également compte d'un déficit initial D_i, c'est-à-dire la quantité d'eau retenue avant le débit du ruissellement effectif. Ainsi, la hauteur de pluie nette devient :

$$\mathbf{H_n}=\frac{(p-D_i)^2}{(p-D_i)+D_p} \qquad \text{(III.19)}$$

Le déficit initial représente une fraction du déficit potentiel maximal et s'écrit donc :

$$D_i=kD_p \qquad \text{(III.20)}$$

D'après le SCS, k=0,2 et la hauteur de la pluie nette devient :

$$\mathbf{H_n}=\frac{(p-0{,}2D_p)^2}{p+0{,}8D_p} \qquad \text{(III.21)}$$

CN et déficit potentiel maximal

Le déficit potentiel maximal (exprimé en mm) est fonction d'un paramètre de ruissellement appelé Curve Number (CN)

$$D_p=25{,}4\left(\frac{1000}{CN}-10\right) \qquad \text{(III.22)}$$

Le CN est quant à lui fonction de la nature du sol, de l'occupation du sol et de l'antécédent pluviométrique. Le tableau (III.7) donne les différentes valeurs de CN pour les conditions antérieures d'humidité du sol moyenne (valeur de dimensionnement).
Les différentes catégories hydrologiques du sol sont définies à partir de leur coefficient de perméabilité :

-catégorie A : très perméables (sols sableux)
-catégorie B : sols moyennement perméables (sol sablo-limoneux)
-catégorie C : peu perméable (sols sablo-argileux)
-catégorie D : très peu perméables (sols argileux)

Hydrogramme unitaire

L'hydrogramme unitaire du SCS (initialement présenté sous forme de tableau donnant la correspondance entre le débit relatif Q/Q_p au temps relatif t/t_p) est un cas particulier d'une fonction gamma [Akan et Houghtalen, 2003] donnée par l'expression :

$$Q_u=Q_{p,u}[xte^{(1-xt)}]^{n-1} \qquad \text{(III.23)}$$

Avec, $x=\frac{1}{t_{p,u}}$

Paramètre de l'averse unitaire	Débit de pointe	Durée	Temps de pointe
Expression mathématique	$Q_{p,u}=\frac{F_p A}{t_{p,u}}$	$t_u=\frac{1}{15}t_c$	$t_{p,u}=\frac{2}{3}t_c$

Tableau III.7 : calcul de l'averse unitaire d'après SCS.

Les SCS recommandent une valeur de F_p=0,125 si on utilise les unités du SI à savoir :

Paramètres	Q_p	A	H_n	t_p
Unités		m^3/s	ha	mm
min				

Cependant d'après [Meadows, 1991], le facteur de pointe varie fortement avec les caractéristiques topographiques et pédologiques (pente, forme, nature du sol) du bassin. L'absence de relation reliant F_p au paramètre mentionné ci-haut constitue une zone d'ombre et rend sa transposition incertaine.

III.3.2.3. Détermination de la quantité à retenir lors d'une précipitation.

La commune de GIHANGA se trouve dans la plaine de l'Imbo où la pluviométrie moyenne est donnée dans le tableau de différentes stations pluviométriques avoisinantes de la commune de GIHANGA. La quantité d'eau disponible dépend des données suivantes :

- la hauteur des précipitations h (mm) ;
- la superficie des bassins versants A (km^2) ;
- le coefficient de ruissellement C_R variant suivant la nature et l'occupation du sol.

Le volume (maximal) pouvant être collecté est donné par :

$$\mathbf{V=10^3 C_R H A} \qquad \text{(III.24)}$$

Avec V (m^3) : volume à collecter ;
A (km^2) : surface du bassin versant ;
H (mm) : hauteur des précipitations ;
C_R : coefficient de ruissellement.

Une méthode celui de SCS permet de déterminer le volume de ruissellement :

$$V=\frac{Q_P t_m}{2}+\frac{Q_P B}{2}=\frac{Q_P}{2}\left\langle t_m+B\right\rangle$$

D'après l'analyse de plusieurs hydrogrammes, on a trouvé que $B=1,67t_m$.

D'où $\mathbf{V=\frac{Q_P}{2}2,67t_m \Rightarrow Q_P=\frac{0,75V}{t_m}}$ encore $\boxed{Q_P=\frac{AH}{5t_m}}$ (III.25)

Avec A : superficie du bassin versant en km^2 ;
t_m : temps de monte en h ;
H : hauteur des précipitations effectives en mm ;

Avec $t_m=t_l+\frac{t_r}{2}$ où t_l : lag en min ;
t_r : durée de l'averse en min.

Et par la formule de Mockus : $t_c=\frac{t_l}{0,6}$

$t_m=\sqrt{t_c}+0,6t_c$ où t_c : temps de concentration en min.

III.3.2.4. Construction d'un hyétogramme synthétique.

III.3.2.4.1. Notion d'hyétogramme synthétique.

Un hyétogramme synthétique ou orage modèle est hyétogramme représentant la variation de la pluie en fonction du temps au cours d'une averse de durée t. Il est dit synthétique parce qu'il est tracé par calcul et non mesuré.

Cet hietogramme doit être telle que l'intensité moyenne soit celle d'une pluie constante de durée t correspondant à la période choisie. Dans le souci de construire cet hyétogramme synthétique, plusieurs méthodes ont été développées pour y arriver à savoir :
-méthode du **Soil Conservation Service (SCS) ;**
-méthode de **Yen et chow** ;
-méthode de **Huff** ;
-méthode **SBH (Synthetic Block Hyetograph**).

Toutes ces méthodes donnent de bons résultats une fois utilisées dans les conditions appropriées. Dans ce travail, on utilise la méthode de SBH

III.3.2.4.2. Méthode SBH.

Pour utiliser cette méthode, il faut connaître la courbe I-D-F de la région concernée, la période de retour de la pluie et la durée de la pluie afin de trouver l'intensité moyenne.
Avec cette méthode, l'intensité maximale dépend de la variation du temps (Δ t) choisie et de l'arrangement de ces intensités.

Mais le principe est qu'il faut placer la portion des intensités élevées entre le tiers et la moitié de la durée de la pluie.

PARTIE II : MODELISATION ET REGULATION DU CYCLE HYDROLOGIQUE. APPLICATION A L'AIDE DE L'EPANET

CHAP.IV : CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT.

Pour délimiter le bassin versant et déterminer ses caractéristiques physiographiques ; on a utilisé un Système d'Information Géographique (SIG)

IV.1. Cartographie numérique et système d'information géographique

IV.1.1. Système d'Information Géographique.

1. Définition.

Il s'agit d'une technologie, très récente, de traitement des informations spatiales utilisées dans les études des phénomènes de l'environnement. Le SIG ou le GIS en anglais (Geographic Information System) est le résultat de la liaison des développements parallèles dans beaucoup de disciplines séparées de traitement de données spatiales [A. Randriamahérisoa, 1983]. Des définitions presque similaires sont données au SIG par différents auteurs :

-Le SIG est un environnement d'analyse multidisciplinaire et spatiale offrant des outils de saisie et de gestion d'information sous forme numérique ainsi que des outils d'analyse, de modélisation et de représentation cartographique [Collet, 1992].

-Le SIG est un outil qui permet de réunir des informations spatiales de sources les plus diverses, de les numériser, de les rendre comparables, de les combiner et de les analyser à travers une véritable base de données cartographiques [Berry et Sailor, 1987].

-Le SIG est une série d'outils puissants qui servent à collecter, à sauvegarder, à extraire, à dessiner et à transformer les données spatiales du monde réel pour différentes utilisations [Bourrough, 1986].

2. Composition d'un SIG.

D'une manière générale, un SIG est constitué :
-D'une base de données géographiques où sont situées toutes les informations sur la zone étudiée sous forme multi locale.
-Des outils de travail pour la saisie, la mise en forme, la gestion, l'analyse et la représentation des informations.
-D'une interface qui gère l'interaction avec l'utilisateur.

La figure suivante nous le montre

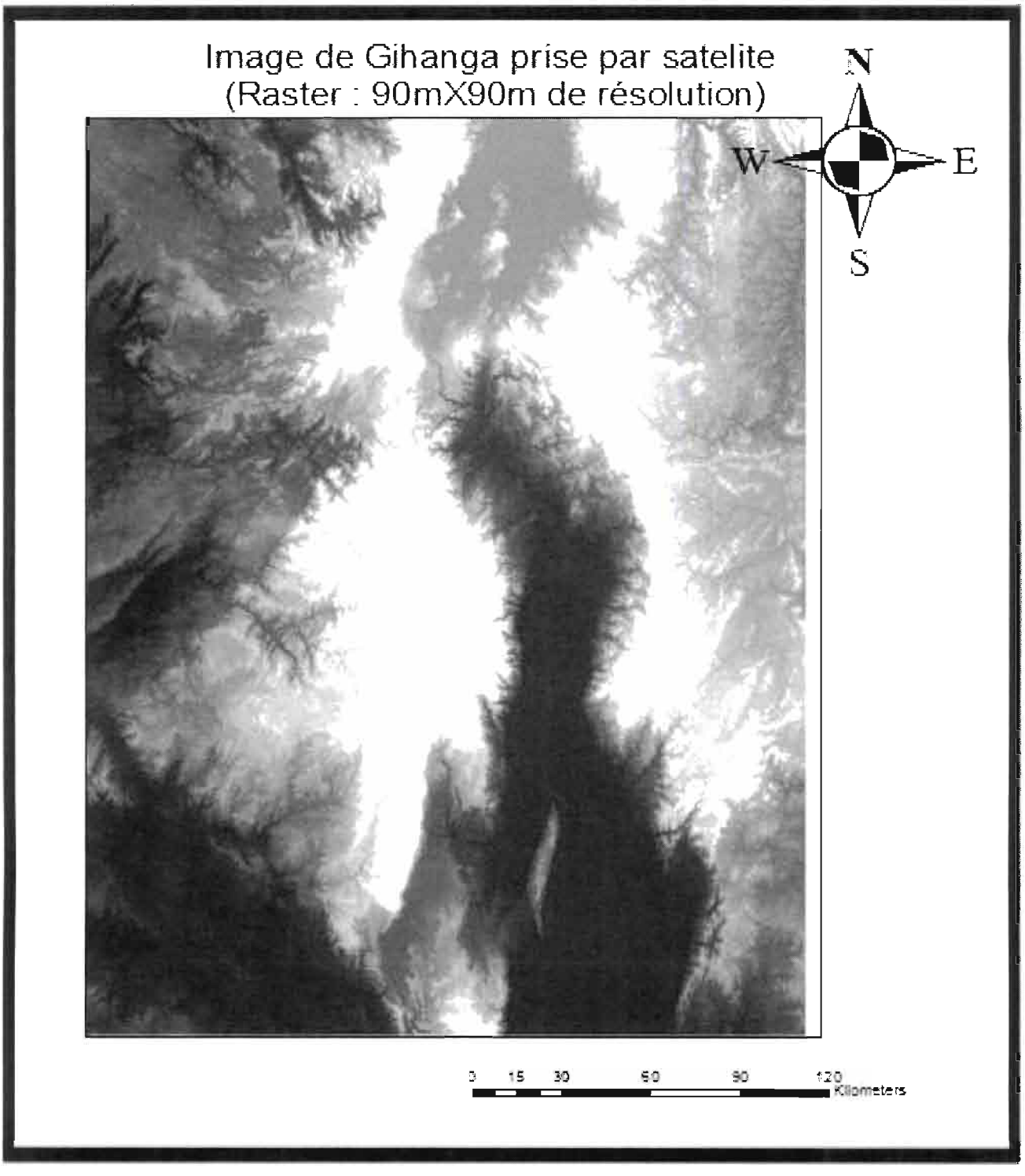


Figure. IV.1. Image de GIHANGA prise satellite (Raster : 90x90m de résolution)

3. Structure des données pour les cartes thématiques.

Toute donnée géographique peut être réduite aux trois concepts topologiques de base : en évitant de travailler sur une grande zone ; nous pouvons juste réduire la zone d'étude donnée à la figure IV.1.sous SIG pour établir un « clip » (ou découpage) selon différentes formes (rectangulaire, par polynôme, circulaire, etc.) ; nous avons adopté pour la forme circulaire tel que visualisé sur la figure suivante :

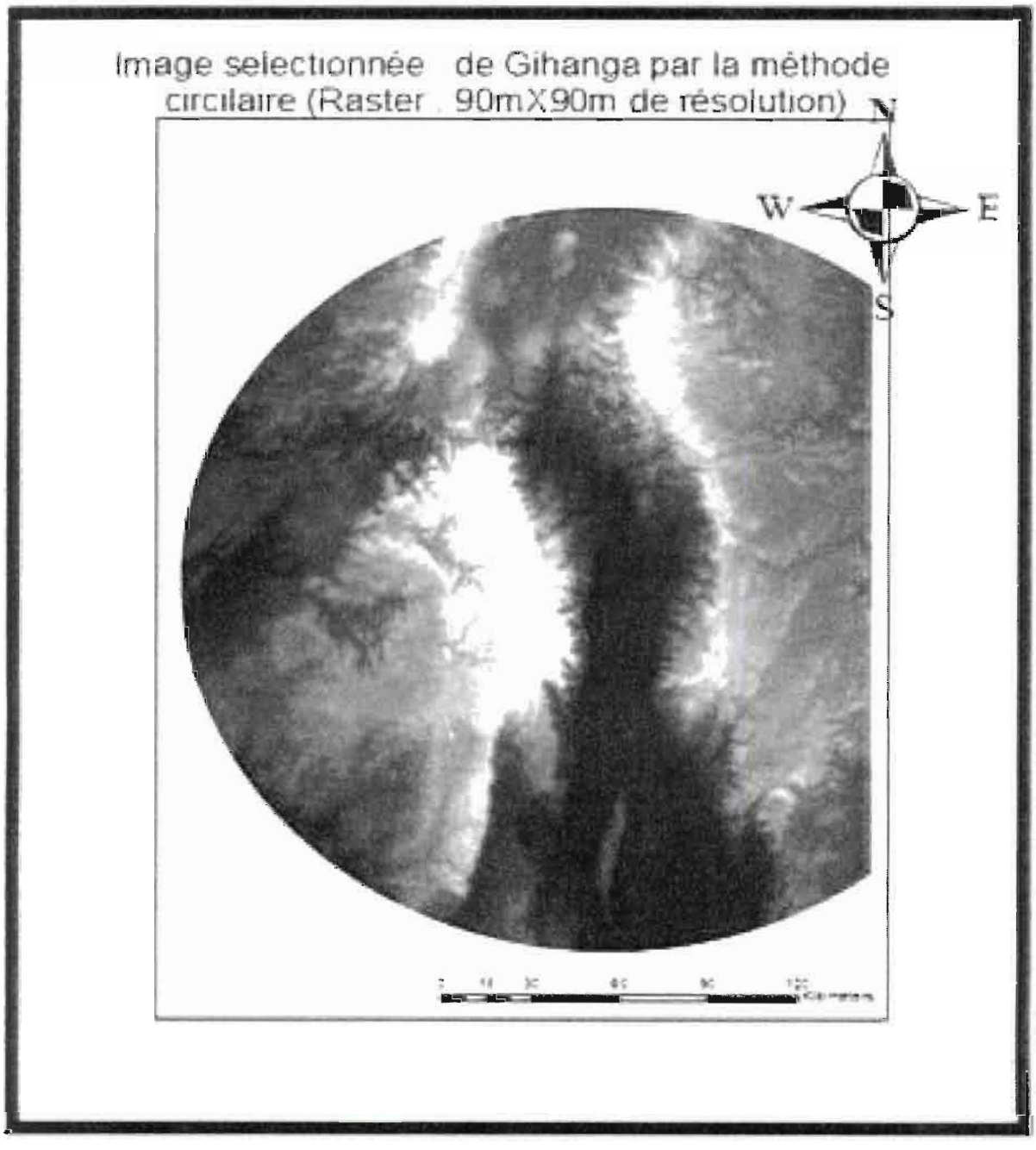


Fig. IV. 2. Image sélectionnée par la méthode circulaire.

IV.1.2. Délimitation du bassin versant.

La délimitation du bassin versant ou des sous bassins versants est réalisée en parcourant le réseau de drainage d'aval en amont en partant des exutoires [Band, 1986]. Un des avantages est qu'il permet de faire la simulation hydrologique basée sur le transfert d'ondes de crue ou sur le laminage des crues par les bassins d'orages installés au niveau des sous bassins. Dans ce cas ; les limites des sous bassins sont utilisées pour masquer les parties extérieures à ceux-ci.

IV.2. Les caractéristiques des sous bassins versants.

IV.2.1. La superficie des sous bassins versants.

Suivant la figure IV.5.qui nous montre les sous bassins de GIHANGA ; on a jugé d'étudier sous bassins 5,6 et 7 pour illustrer le comportement de ces sous bassins de GIHANGA.

Localisation et limite du bassin versant de la zone du projet (Gihanga)
(Image sélectionnée par la méthode circulaire).

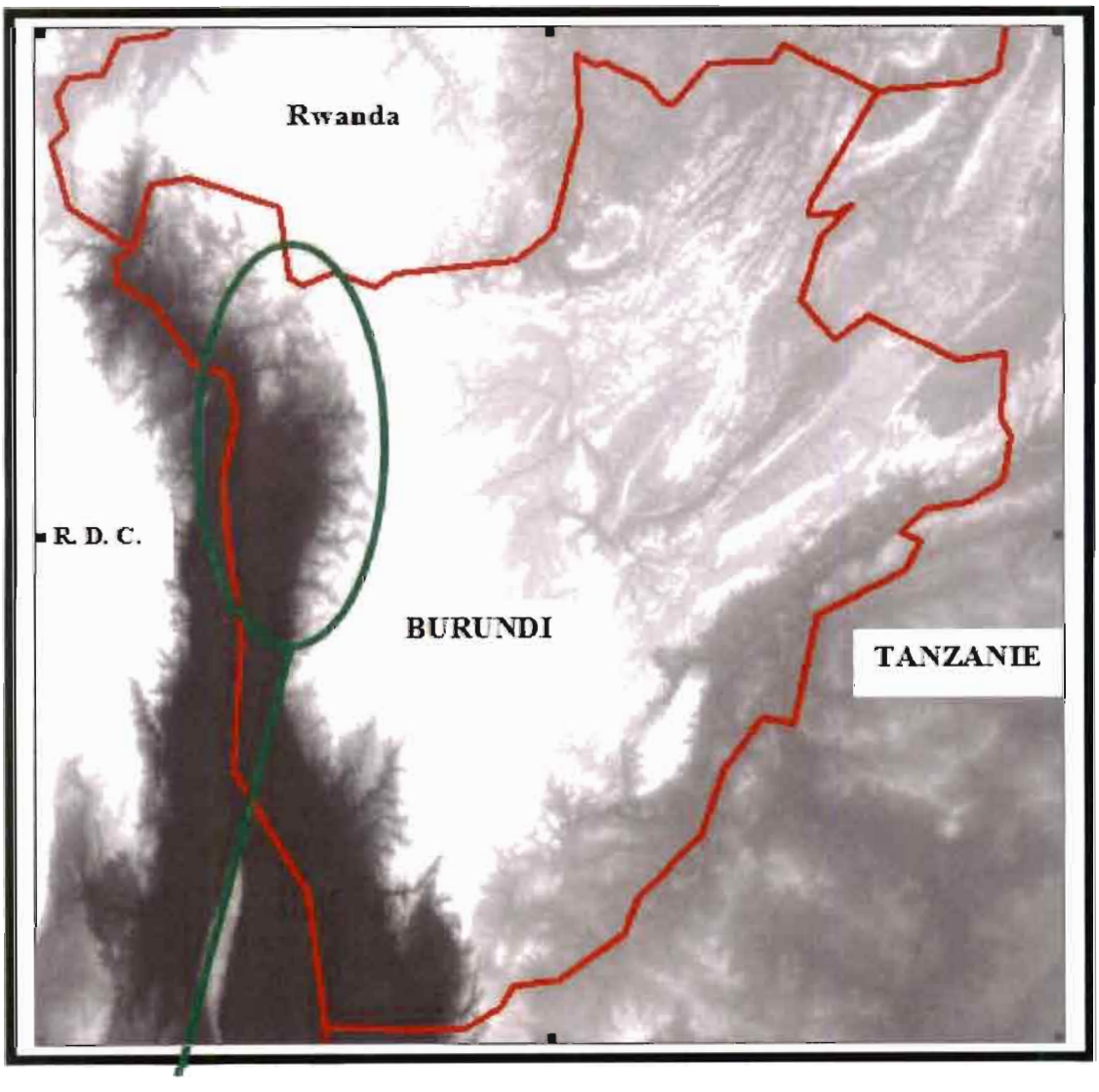
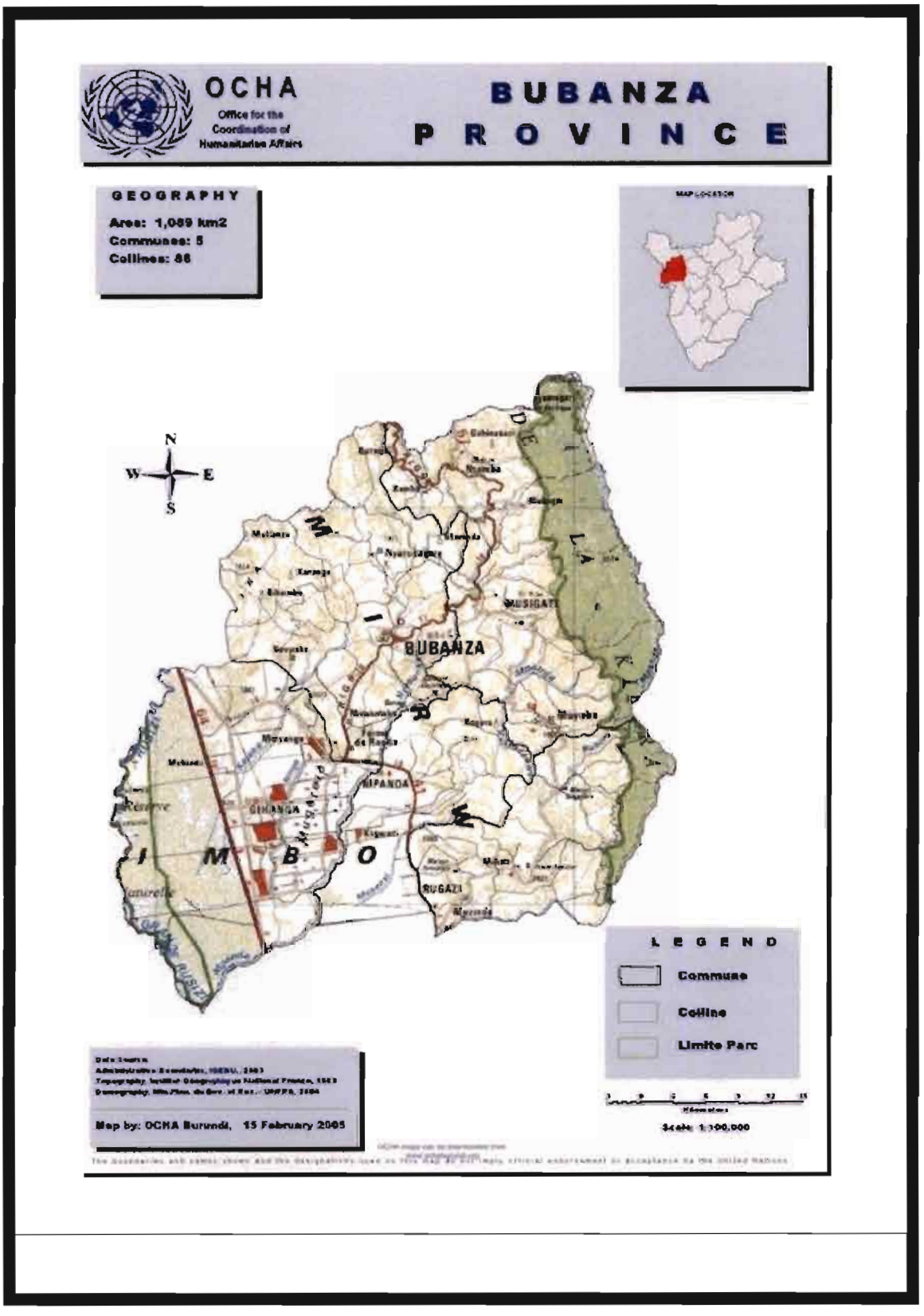


Figure IV.3 : carte du Burundi avec la localité de GIHANGA(en vert)



FigureIV.4.Carte de la province de bubanzaSource: OCHA (Office for the coordination of Humanitarian Affairs)

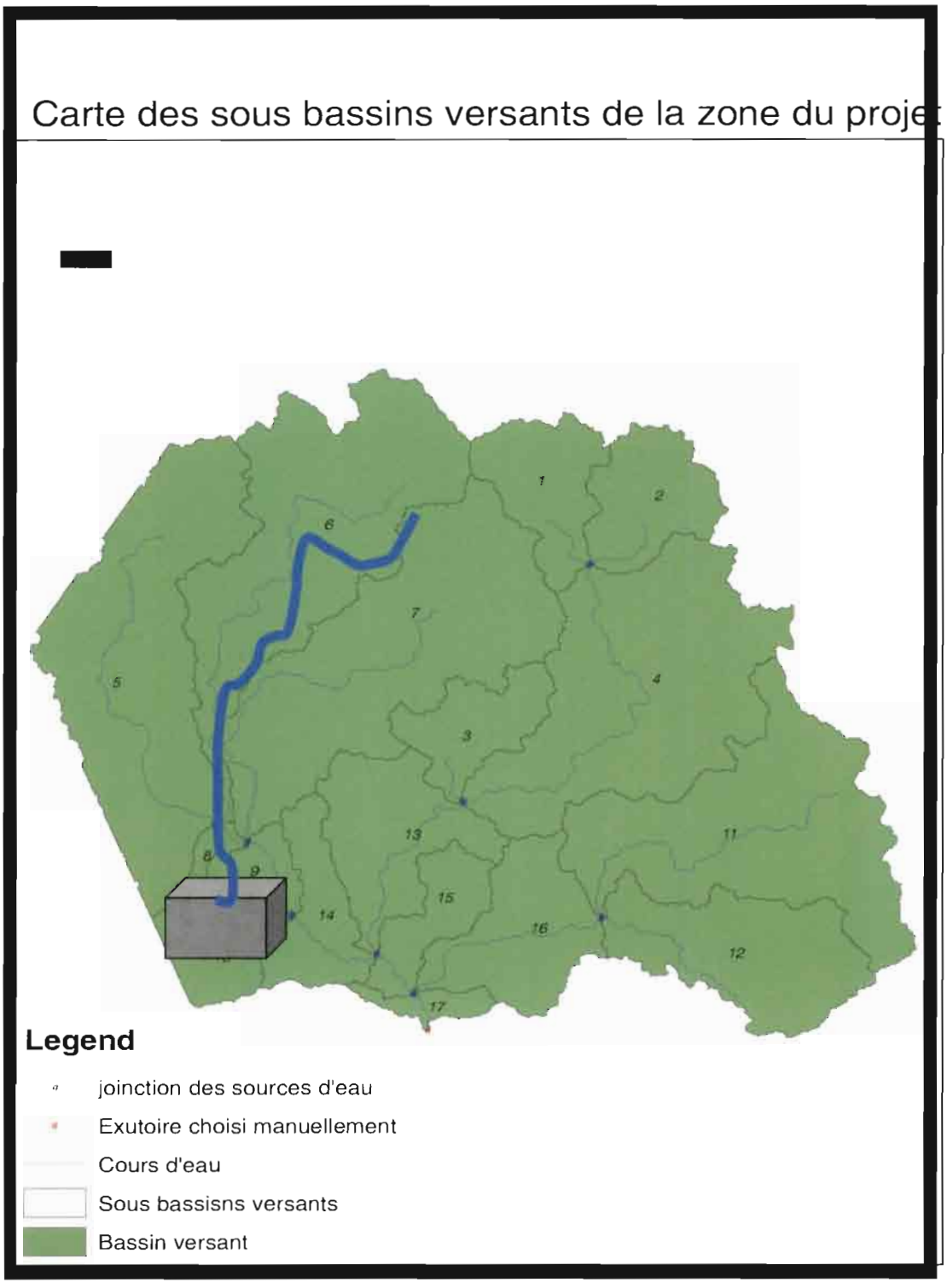


Figure IV.5: Représentation schématique des sous bassins versants de la localité de Gihanga

Le tableau suivant nous montre les sous bassins et leurs différentes superficies :

BASSINS VERSANTS	AIRES (ha)
1	407,9133333
2	399,4533333
3	406,78
4	1278,593333
5	1893,926667
6	1812,506667
7	1941,026667
8	67,92666667
9	135,9866667
10	271,9333333
11	852,4
12	568,2666667
13	458,6
14	269,56
15	266,2866667
16	345,9466667
17	92,65333333

Carte des sous bassins versants de la zone du projet

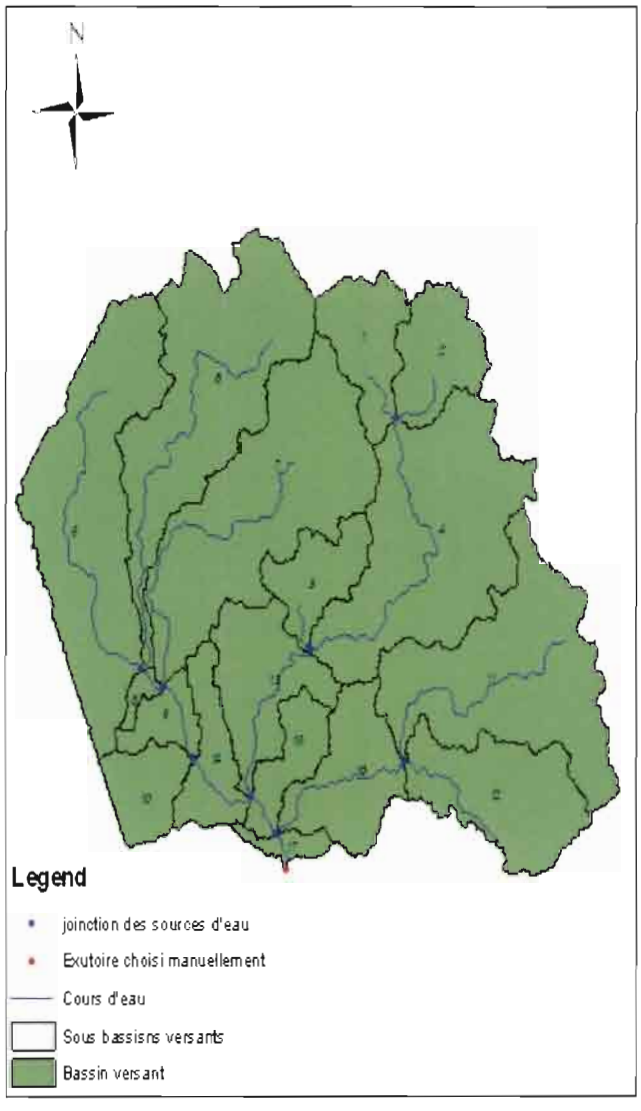


Tableau IV.1.Sous bassins versants et leurs différentes superficies

IV.2.2. Occupation des sous bassins versants

Le bassin versant est strictement rural sur toute sa partie. Il est situé dans la plaine de la RUSIZI avec une pente moyenne très petite. Cette commune est occupée par des paysannats et des pâturages.

IV.2.3. Pentes.

Elle est déterminée au niveau de chaque nœud de la tangente de la ligne de plus grande pente par rapport aux huit voisins immédiats [Weibel et Heller, 1991]. Pour les sous bassins de la commune GIHANGA, le choix des classes de pente a été guidé par la morphologie du bassin. La figure ci dessous nous montre les différentes pentes.

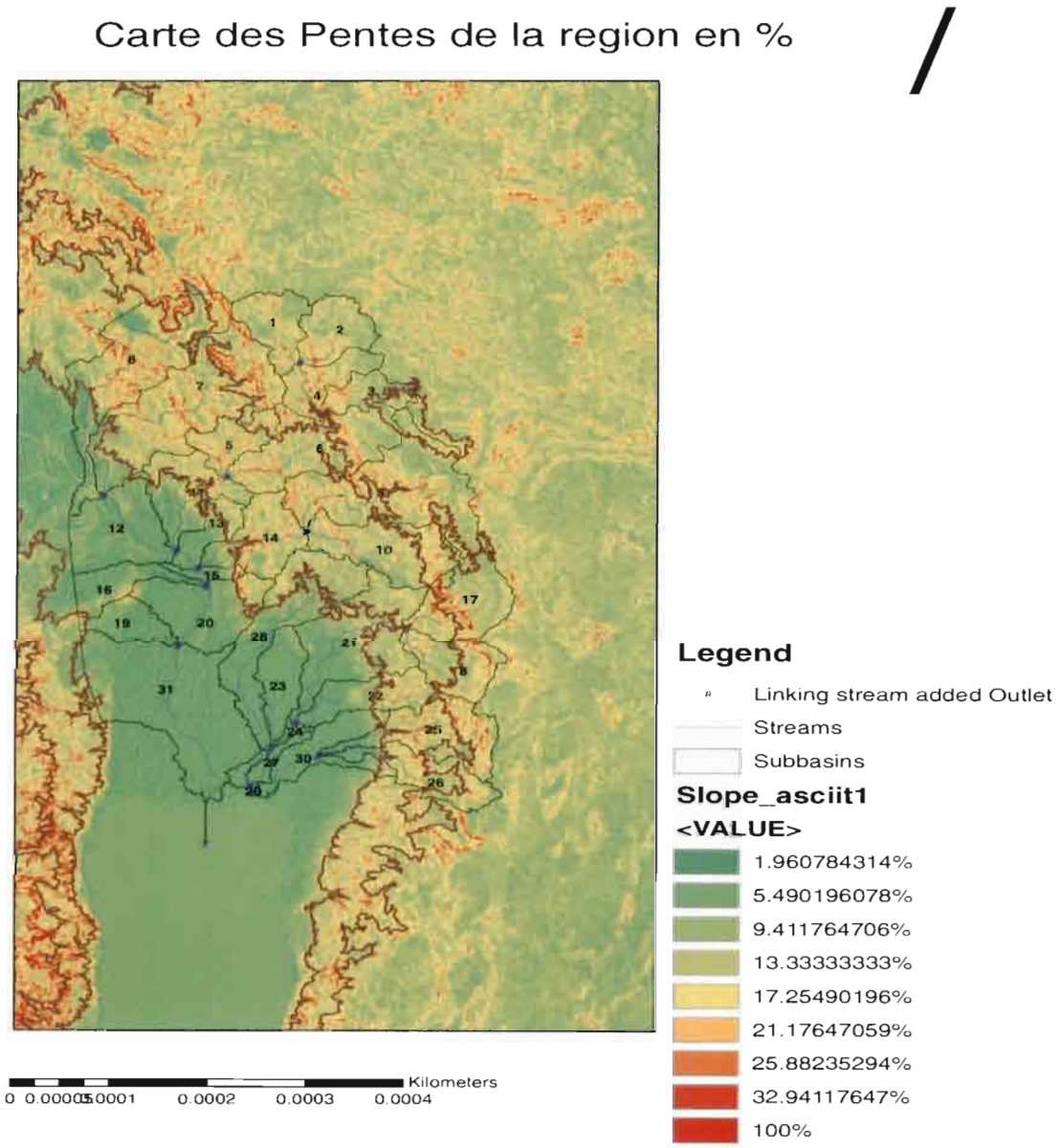


Fig. IV. 6. Cartes des pentes en %.
Cette figure montre que la pente des ces sous bassins est inférieure à 2 %.

IV.3. Calcul du débit de pointe.

Les renseignements relatifs aux débits du bassin versant de GIHANGA sont fournis par les différentes stations météorologiques installées dans la commune. Mais compte tenu des sous bassins numéro 5,6 et 7 intéressants notre étude et par le réseau des isohyètes, les débitrelatiau sous bassin 5seront donnés par les relevées de la station de Rukoko; celui de 6 par celle de Mpanda et celui de7 par celle Randa.

IV.3.1. Prise en compte de la forme du bassin versant.

Le bassin versant de la commune GIHANGA a été subdivisé en plusieurs sous bassins versants comme l'illustre la représentation cartographique de la figure IV.5.
Mais notre étude a été intéressée par les sous bassins numéro 5,6 et 7dont les surfaces ont été données dans le tableau IV.1.

IV.3.2. Calcul du débit de projet.

Le débit de projet est celui afférent à l'exutoire principal du sous bassin numéro 17 comme le montre la figure IV.5

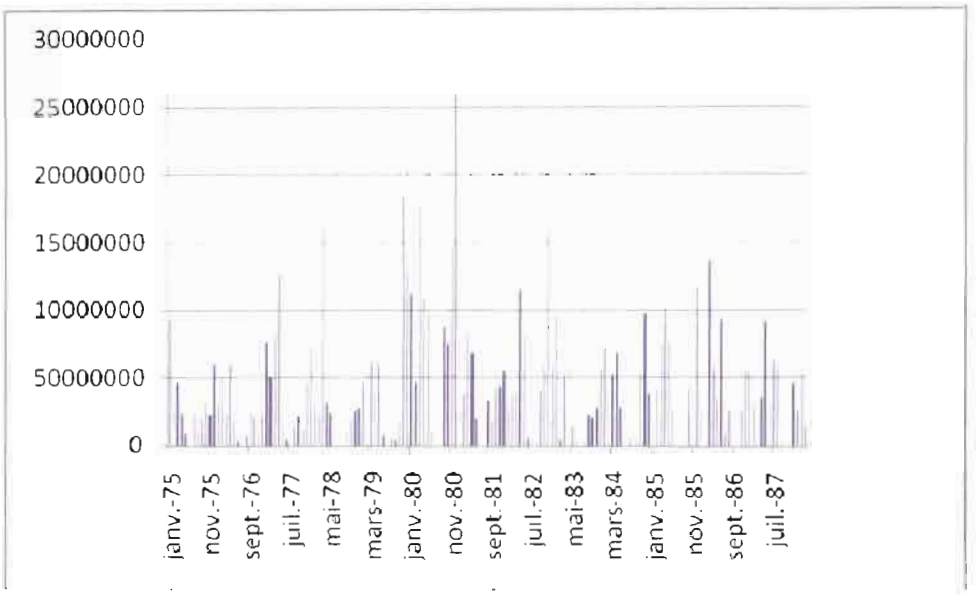
IV.3.2.1. Evaluation du coefficient de ruissellement.

Le coefficient de ruissellement a été évalué d'après la nature du sol et de l'occupation du bassin versant , du coefficient volumétrique de ruissellement et on a pris égal à 0,03375.

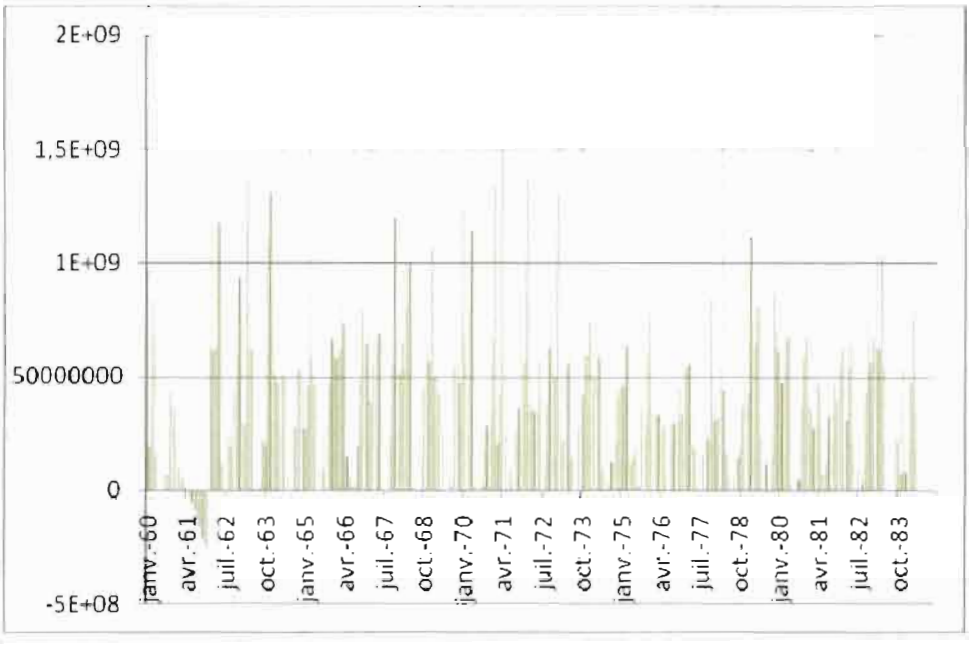
IV.3.2.2. Calcul du débit de pointe proprement dit et du volume maximal à retenir.

A partir des précipitations relevées sur différentes stations ci haut citées ; avec les surfaces de ces sous bassins (5,6,7,) données dans le tableau IV.1 ; du coefficient de ruissellement et la pente moyenne des sous bassins donnée à la figure IV.6, on calcule le débit de pointe par la formule (III.15) et le volume maximal à retenir par la formule (III.24).Toutefois voici les graphiques montrant les débits.

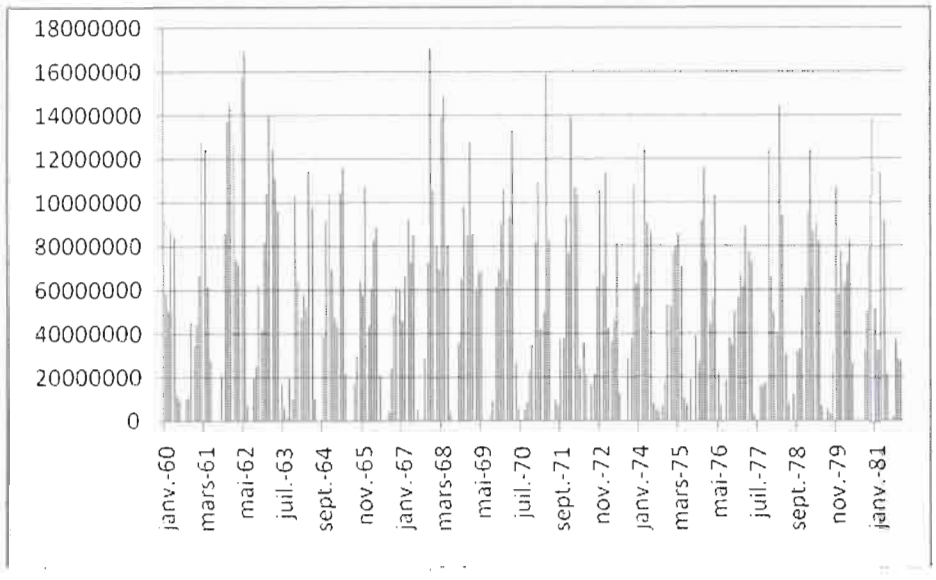
Sous-bassin 5(1893,926667ha) avec volume max de 258492581m^3



Sous-bassin 6(1812,506667ha) avec volume max de 1887333017m^3



Sous bassin 7(1941,026667ha) avec volume max de 170986067m^3



CHAP.V : MODELISATION DU TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE A L'AIDE DE L'EPANET

V.1. GENERALITES SUR EPANET

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau sur de longues durées dans les réseaux sous pression. Un réseau est un ensemble de tuyaux, nœuds (jonctions de tuyau), pompes, vannes, bâches et réservoirs. EPANET calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs, et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau, au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes. Le logiciel est également capable de calculer les temps de séjour et de suivre l'origine de l'eau.

EPANET a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau dans les systèmes de distribution. Il peut être utilisé pour différents types d'application dans l'analyse des systèmes de distribution. En voici quelques exemples: définition d'un programme de prélèvement d'échantillons, calage d'un modèle hydraulique, simulation du chlore résiduel, et estimation de l'exposition de la population à une substance. EPANET offre une aide à la recherche de stratégies alternatives pour gérer le réseau, comme par exemple:

• utilisation en alternance des différentes ressources du système,
• modifier le régime de pompage ou de marnage des réservoirs,
• préciser l'usage des stations de rechloration (ou autres retraitements) en réseau,
• planifier l'entretien et le remplacement de certaines canalisations.

Disponible sous Windows, EPANET fournit un environnement intégré pour l'édition de données de réseau, pour l'exécution de simulations hydrauliques et de simulations qualité, et pour l'affichage des résultats sous plusieurs formats (des cartes avec des codes couleurs, des tableaux et des graphiques).

EPANET modélise un système de distribution d'eau comme un ensemble d'arcs reliés à des nœuds. Les arcs représentent des tuyaux, des pompes, et des vannes de contrôle. Les nœuds représentent des nœuds de demande, des réservoirs et des bâches.

Nœuds de demande

Les Nœuds de Demande sont les points du réseau où les arcs se rejoignent. Ce sont des points d'entrée ou de sortie d.eau et peuvent également ne pas avoir de débit. Les données d'entrée minimales exigées pour les n.uds de demande sont:
-L'altitude au-dessus d'un certain plan de référence (habituellement le niveau de la mer).
- demande en eau (débit prélevé sur le réseau).
- la qualité initiale de l'eau.
Les résultats calculés aux nœuds de demande, à chacun des intervalles de temps d'une simulation sont:
-la charge hydraulique (ou hauteur piézométrique): énergie interne par

poids spécifique de fluide ou bien somme de l'altitude avec la hauteur de pression.

Bâches

Les Bâches infinies sont des nœuds représentant soit une source externe de capacité infinie. Elles sont utilisées pour modéliser des éléments tels que les lacs, les fleuves, les couches aquifères souterraines ou les arrivées de réseaux extérieurs. Les bâches infinies peuvent également servir de point d'injection d'une substance entrant dans le réseau.
Les données de base pour une bâche sont la charge totale (égale au niveau de la surface de l'eau si la bâche infinie n'est pas sous pression) et la qualité initiale de l'eau dans le cas où l'on exécuterait une analyse de qualité de l'eau.
Puisqu'une bâche est un élément de frontière d'un réseau, la qualité et la charge hydraulique de l'eau ne peuvent pas être affectées par ce qui se produit dans le réseau. Par conséquent, aucune propriété n.est calculée au cours de la simulation. Cependant, on peut faire varier sa charge hydraulique dans le temps en lui assignant une courbe de modulation (voir Courbes de Modulation cidessous).

Réservoirs

Les réservoirs sont des noeuds avec une capacité de stockage, dont le volume d.eau stocké peut varier au cours du temps. Les données de base pour des réservoirs sont les suivantes:
-l'altitude du radier (où le niveau d'eau est zéro)
- le diamètre (ou sa forme s'il n'est pas cylindrique)
- les niveaux initial, minimal et maximal de l'eau
-la qualité initiale de l'eau.
Les principaux éléments calculés dans la simulation sont les suivants:
-la charge (altitude de l'eau)
-la pression (niveau de l.eau)
-. la qualité de l'eau.

Le niveau dans les réservoirs doit rester entre les niveaux minimal et maximal. EPANET arrête la sortie d'eau si un réservoir est à son niveau minimal et arrête l'arrivée s'il est à son niveau maximal. Les réservoirs peuvent également servir de source pour une substance entrant dans le réseau.

Tuyaux

Les tuyaux sont des arcs qui transportent l'eau d'un point du réseau à l'autre. EPANET suppose que tous les tuyaux sont pleins à tout instant. L.eau s.écoule de l'extrémité qui a la charge hydraulique la plus élevée (altitude + pression, ou énergie interne par poids d'eau) à celle qui a la charge hydraulique la plus faible. Les données de base pour les tuyaux sont:
-les noeuds initial et final;
-le diamètre;
-la longueur;
- le coefficient de rugosité (pour déterminer la perte de charge);
- l'état (ouvert, fermé, ou avec un clapet anti-retour).

Les valeurs calculées pour les tuyaux incluent :
-le débit
- la vitesse d'écoulement
-la perte de charge
- le facteur de friction de Darcy-Weisbach
- la vitesse moyenne de réaction (le long du tuyau)
-la qualité moyenne de l'eau (le long du tuyau)

La perte de charge ou charge hydraulique perdue à cause du frottement de l'eau avec les parois du tuyau peut être calculée en utilisant une de ces trois formules :
-formule de Hazen-Williams
- formule de Darcy-Weisbach
- formule de Chezy-Manning

Formule de Hazen-Williams

$$H_L=\frac{4.727LQ^{1.852}}{C^{1.852}d^{4.871}}$$

Où:

HL=Perte de charge
Q=Débit
L=Longueur de la conduite
d=Diamètre de la conduite
C=Coefficient de rugosité (Hazen-Williams)

Formule Darcy-Weisbach

$$H_L=f\frac{LV^2}{2gd}$$

Où:
HL=Perte de charge (Longueur)
g=accélération
L=longueur de la conduite
d=diamètre de la conduite
v=vitesse dans la conduite
f=facteur de friction

Formule de Chézy-Manning

$$H_L=\frac{4.66n^2LQ^2}{d^{533}}$$

Où :
HL=perte de charge
Q=débit
L=longueur de la conduite
d=diamètre de la conduite
n=coefficient de rugosité de Manning

La formule de Hazen-Williams est la formule de perte de charge la plus utilisée aux États-Unis. Elle ne peut pas être utilisée pour des liquides autres que l'eau et a été initialement développée uniquement pour les écoulements turbulents. La formule de Darcy-Weisbach est théoriquement la plus correcte et est la plus largement utilisée en Europe. Elle s'applique à tous les régimes d'écoulement et à tous les liquides. La formule de Chézy-Manning est généralement utilisée pour les écoulements dans les canaux découverts et pour les grands diamètres.
La formule de Darcy-Weisbach est sélectionnée par défaut.

Chaque formule utilise un coefficient de rugosité différent qui doit être déterminé empiriquement.
Il est important de noter que le coefficient de rugosité d'un tuyau peut changer considérablement avec son âge.

Pompes

Les pompes sont des arcs qui ajoutent de l'énergie à un fluide et augmentent ainsi sa charge hydraulique. Les principaux paramètres d'entrée pour une pompe sont ses n.uds d'aspiration et de décharge et sa courbe caractéristique (la combinaison des charges hydrauliques et des débits que la pompe peut fournir à sa vitesse nominale). Au lieu d'une courbe caractéristique, la pompe peut être représentée comme un élément qui fournit une puissance constante (en Kilowatts) au fluide pour toutes les combinaisons de débit et de charge hydraulique.
Les principaux paramètres calculés sont le débit et le gain de charge hydraulique. Le fluide traverse la pompe en sens unique et EPANET ne permet pas aux pompes de fonctionner en dehors de leur courbe caractéristique.

Des pompes à vitesse variable peuvent également être définies; la variation de leur vitesse est soumise aux même conditions que dans le cas antérieur. Par définition, la courbe caractéristique fournie d.une pompe a une consigne relative de vitesse 1. Si la vitesse de la pompe est doublée, la consigne relative de vitesse est 2; si elle fonctionne à la moitié de sa vitesse, la consigne relative de la vitesse sera 0,5 et ainsi de suite.

Vannes

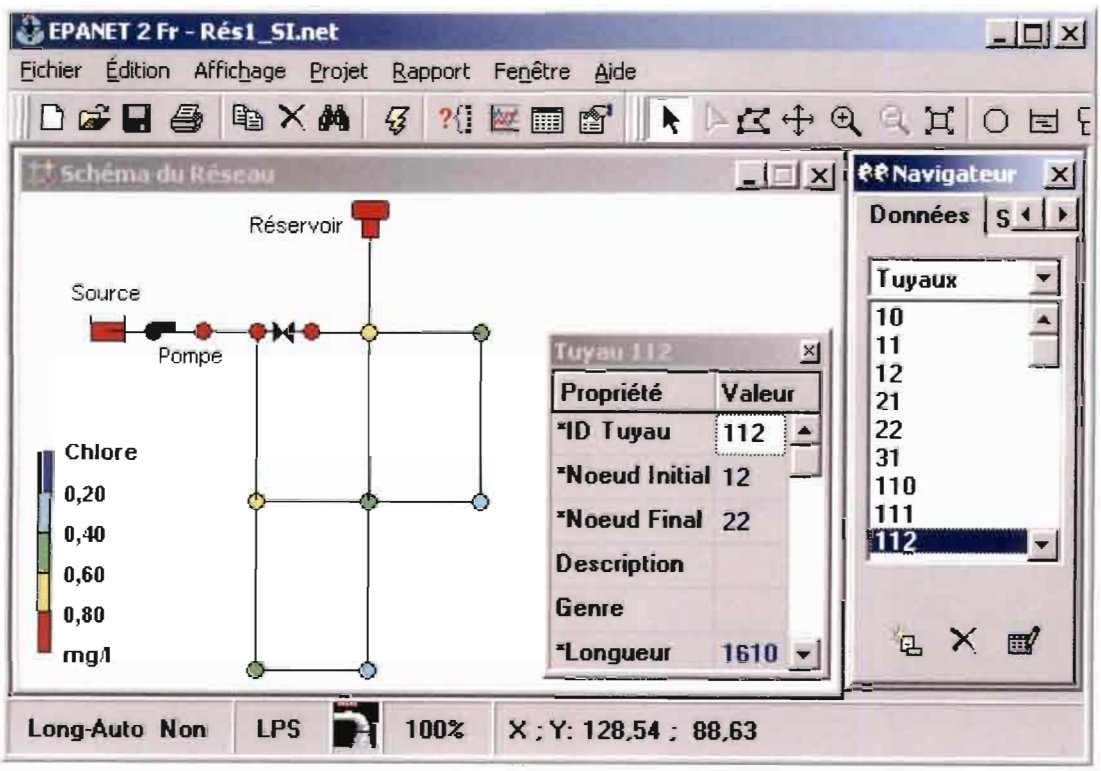
Les vannes sont des arcs qui limitent la pression ou le débit en un point précis du réseau. Leurs principaux paramètres d'entrée sont:
- les nœuds d'entrée et de sortie
- le diamètre
- la consigne de fonctionnement
- l'état de la vanne.

Les éléments calculés en sortie de simulation pour une vanne sont le débit et la perte de charge hydraulique.
Les différents types de vannes qu'offre EPANET sont:
- Vanne stabilisatrice aval
- Vanne stabilisatrice amont

-Vanne brise-charge ou réducteur de pression
- Vanne régulatrice de débit ou limiteur de débit
- Vanne diaphragme
-Vanne d'usage général

V.2.L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL DE BASE D'EPANET

L'environnement de travail de base d'EPANET est affiché dans la figure ci-dessous. Les éléments d'interface sont: une Barre de Menu, deux Barres d'Outils, une Barre d'État, une fenêtre du Schéma du Réseau, une fenêtre de Navigateur, et une fenêtre d'Éditeur des Propriétés.



V.3. INTRODUCTION SUR LE MODEL

Pour une compréhension améliorée des déplacements et des transformations de l'eau dans leurs systèmes de distribution ; l'usage des Outils d'Aide pour la prise des Décisions s'avèrent plus que nécessaires pour mieux gérer les services de distribution surtout dans les zones urbaines ou la demande ne cesse de croitre.

Dans notre travail, nous avons jugé bon d'en faire une démonstration avec un logiciel de la famille E.P.A. (Environmental Protection Agency) des Etats Unis d'Amérique pour compléter le travail effectuée sur la gestion de l'eau en Commune de Gihanga.

.

EPANET est un modèle de simulation informatique qui y contribue et exprime une demande toujours plus grande en ce qui est des données d'entrées.
Il prédit le comportement hydraulique dynamique et qualitatif de l'eau dans un système de distribution d'eau potable sur une longue durée.

EPANET est un logiciel développé pour la simulation du comportement des systèmes de distribution d'eau d'un point de vue hydraulique et également d'un point de vue qualité de l.eau.Ce logiciel est distribué gratuitement par l'E.P.A. depuis le mois de septembre 1993. Depuis, il est largement utilisé dans le monde entier grâce à ses algorithmes de calcul les plus avancés son interface graphique conviviale et intuitive aux possibilités de relations avec d'autres logiciels d'application à l'existence d.une liste d'utilisateurs, lieu de communications et d'échanges. L'utilisation d'EPANET est très diversifiée, et porte principalement sur la régulation des pressions dans le réseau, la détection des zones de fonctionnement déficitaire le dimensionnement de travaux d'amélioration du réseau ou d'extension l'évolution de la qualité de l.eau et l'étude de retraitement en différents points du réseau l'amélioration de la gestion des équipements (au niveau des réservoirs.), des coûts énergétiques (fonctionnement des stations de pompage.), du contrôle des débits d'eau (sectorisation du réseau.), de la gestion de crise (suppression d'une ressource, rupture d'une canalisation maîtresse, introduction de contaminants dans le réseau.) etc...

V.4. MANIPULATION DES OBJETS.

EPANET utilise différents types d'objets pour modéliser un réseau de distribution. Ces objets peuvent être manipulés soit dans le schéma du réseau, soit dans la rubrique de données du Navigateur. Ces objets peuvent être utilisés pour la création, la sélection, l'édition, la suppression et le repositionnement.

Les réseaux d'EPANET sont composés d'objets physiques, visualisés sur le schéma et d'objets non-physiques contenant des informations sur l'organisation et le fonctionnement du réseau. Ils peuvent être classés selon les catégories suivantes:

- **Nœuds**
  (a) Nœuds de Demande
  (b) Bâches
  (c) Réservoirs

- **Arcs**

  (a) Tuyaux
  (b) Pompes
  (c) Vannes

- **Textes**

- Courbes
- Courbes de Modulation
- Commande
  (a) Simples
  (b) Élaborées

Tous ces objets, à l'exception des Textes, ont été décrit et les textes sont des notes placées à tout endroit du schéma du réseau, pour
identifier certaines zones ou pour donner des informations. On peut les déclarer comme observant des résultats, ancrés à certains noeuds ou arcs pour afficher la valeur du paramètre actif sélectionné dans le Navigateur du Schéma

V.5. LA SIMULATION.

Après la saisie des informations du réseau, une simulation hydraulique ou qualité peut être réalisée. Dans cette partie du travail, le choix des options de simulation, le lancement d'une simulation et la résolution des problèmes sera choisi en fonction des paramètres qui vous intéressent et selon les représentations qui vous paraissent plus logique ou convenable. Les spécifications d'options de simulations nous distinguons cinq catégories d'options spécifiant le type de calcul effectuées par EPANET :
Ce sont les options suivantes:

- Hydrauliques,
- Qualité,
- Réactions,
- Temps, et
- Énergie.

V.6. LE TRACE DU RESEAU.

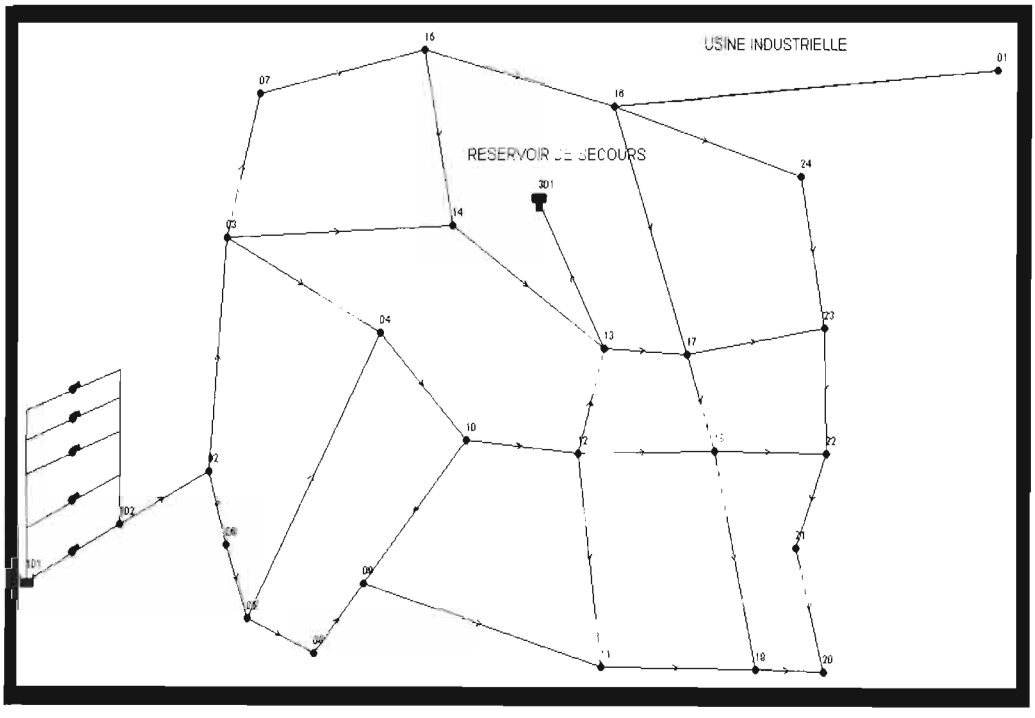
Les boutons de la barre d'outils sont choisis par la souris en fonction des éléments que l'on désire placer sur le réseau en question, en commençant par :

- Les nœuds et les réservoirs à leur correct emplacement
- Ensuite les conduites et autres accessoires dans le réseau d'A.E.P.
- Nous nous sommes basés sur une image satellitaire sur ''GOOGLE EARTH'' de cette commune de GIHANGA en guise de vérification.

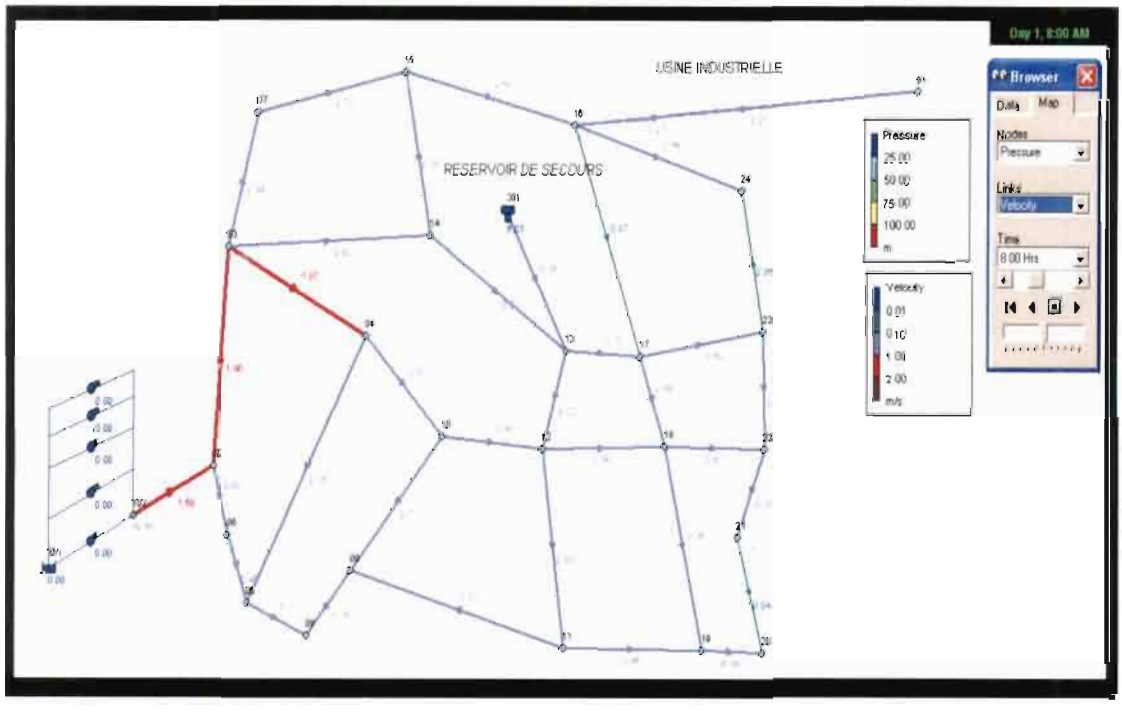
V.7. SAISIE DES PROPRIETES.

A mesure qu'on ajoute des objets à un projet, EPANET leur assigne un ensemble de propriétés par défaut. Pour modifier la valeur d'une propriété particulière d'un objet, il faut sélectionner de plusieurs façons, nous le montrerons dans une démonstration en parallèle avec ce que nous avons construit dans notre projet.

V.8. PRESENTATION DU SCHEMA DU RESEAU D'A.E.P ETUDIE



V.8. 1. PRESENTATION DES RESULTATS.



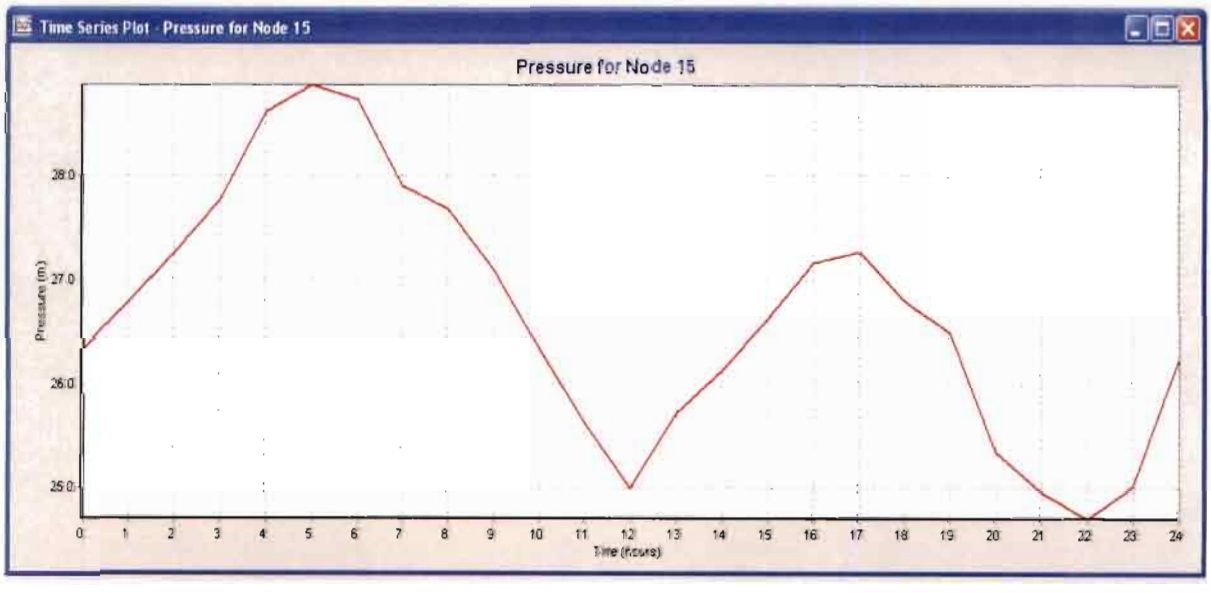
V.8. 1.1. Affichage des résultats sur le schéma (Méthode d'Animation)

Selon les paramètres sélectionnés, le pas et la durée de simulation ; le Logiciel permet de visualiser l'évolution ou le changement des paramètres afin de pouvoir juger de façon plus aisée de l'évolution des paramètres.

Figure V. 1. Présentation d'un cas de simulation des pressions dans les nœuds et des vitesses dans les conduites.

V.8. 1.2. Affichage des résultats à l'aide d'un graphique

Pression dans les nœuds.



Vitesses de l'eau dans les conduites

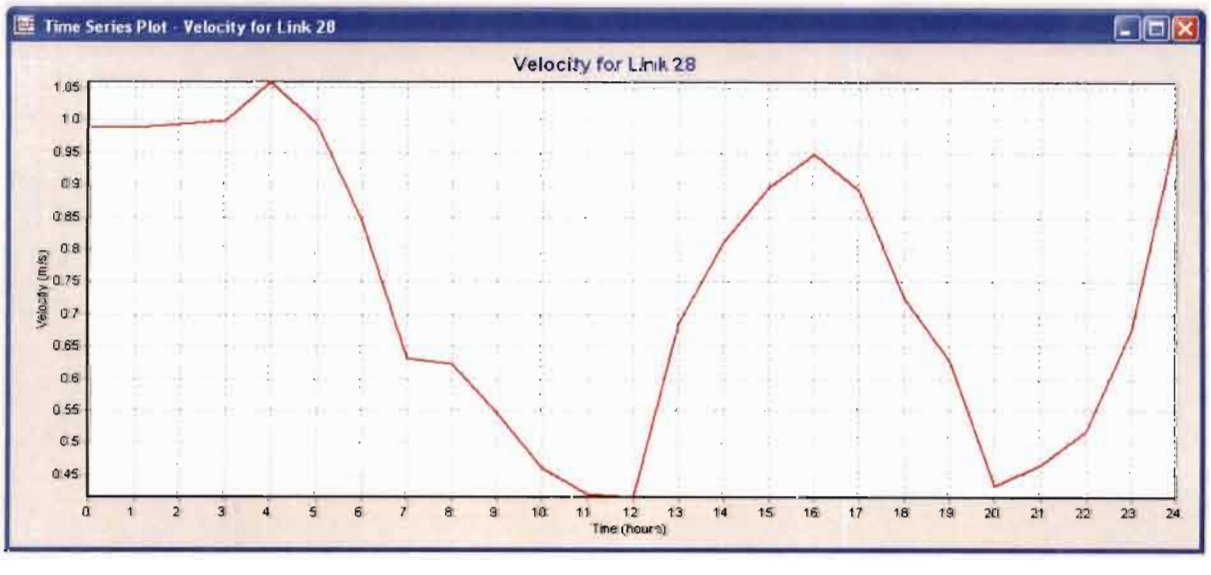


Figure V. 2a et b : Présentation par la méthode graphique des pressions dans les nœuds (Nœud 15) et des vitesses dans les conduites (Conduite 28).

V.8. 1.3. Affichage des résultats à l'aide d'un tableau

EPANET 2 - TRUE Version finale Memoire Kirura-Aimable.NET - [Network Table - Links at 0:00 Hrs]

File Edit View Project Report Window Help

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d	Quality	Status
Pipe 111	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	Open
Pipe 122	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	Open
Pipe 02	418.04	1.48	3.60	0.019	0.00	0.00	Open
Pipe 03	39.09	0.55	1.25	0.024	0.00	0.00	Open
Pipe 04	140.31	1.12	3.43	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 05	-6.27	0.20	0.30	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe 06	-30.10	0.43	0.75	0.024	0.00	0.00	Open
Pipe 07	7.19	0.23	0.39	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe 08	1.86	0.37	3.16	0.036	0.00	0.00	Open
Pipe 09	-14.94	0.48	1.56	0.027	0.00	0.00	Open
Pipe 10	128.44	1.02	2.89	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 11	96.47	0.77	1.65	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 12	0.13	0.03	0.01	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe 13	-25.26	0.36	0.54	0.025	0.00	0.00	Open
Pipe 14	9.38	0.30	0.64	0.028	0.00	0.00	Open
Pipe 15	8.99	0.29	0.59	0.028	0.00	0.00	Open
Pipe 16	7.73	0.25	0.44	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe 17	3.72	0.21	0.48	0.032	0.00	0.00	Open
Pipe 18	-0.31	0.04	0.03	0.033	0.00	0.00	Open
Pipe 19	-4.01	0.23	0.55	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe 20	10.31	0.33	0.77	0.028	0.00	0.00	Open

Figure V. 3a et b : Présentation par la méthode de tableau des pressions dans les nœuds et des pertes de charges dans les conduites.

Toutefois les paramètres dans cet outil peuvent être variés, que ce soit dans les nœuds ou dans les conduites ; il appartient à l'utilisateur de sélectionner ce qui lui parait intéressant dans son analyse.

CHAP.VI : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.

Ce travail a été l'occasion de revoir à nouveau les connaissances acquises au cours de notre formation d'Ingénieur civil, telles les notions très importantes d'Hydraulique, d'Hydrologie, des Problèmes d'Hydrauliques Spéciaux etc. qui loin de se limiter à des formules déjà établies, nécessitent l'appréhension et la compréhension des phénomènes hydrauliques concernée. Elle nous a fourni aussi l'occasion d'acquérir de nouvelles connaissances en matières de l'utilisation du logiciel EPANET et les connaissances en matière des bassins versants ceci grâce au promoteur de cette étude Ir et Maitre des Sciences en hydro informatique **NIYONZIMA William.**

Dans les perspectives de la poursuite de ce travail, notre objectif est d'étudier la distribution d'eau avec l'appui de l'outil informatique EPANET pour l'efficacité de la prise des décisions et de caractériser en détail au point de vue hydrologique le comportement du bassin versant étudié

Dans l'optique de faire notre travail le début d'un autre travail, nous invitons nos successeurs à lui chercher une suite notamment dans l'impacte d'une meilleure rentabilisation de l'eau au BURUNDI ou une comparaison de certains éléments de cette étude avec des structures hydrauliques déjà existantes. Sous cet aspect, notre satisfaction est de se savoir capable d'offrir quelque chose qui peut servir d'outil ou d'instrument de travail à l'humanité.

Nous recommandons également à l'IGEBU la Direction Générale de Hydraulique de :
-renforcer les techniques hydrologiques par des logiciels pouvant faciliter leur travail ;
-améliorer les techniques de saisie et de conservation des données afin de permettre au demandeur un accès rapide et efficace à la banque des données hydrologiques ;
-renforcer et réhabiliter les stations hydrologiques dans tout le pays ;
Cela contribuerait à une meilleure gestion de l'environnement.

Au terme de ce travail, nous reconnaissons de n'avoir pas éludé la problématique, sa complexité et l'imprécision de certaines formules. Nous reconnaissons également l'existence probable de quelques erreurs ou de cas non traités ; pour cela, nous accueillons avec plaisir les remarques critiques et corrections de nos lecteurs pouvant contribuer à l'amélioration de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

I. Ouvrages généraux

1. Lewis A. Rossman, EPANET 2 USERS MANUAL, Environemental protection agency EPA/600/R-00/057, 2000

II. Projets

1. ISHIMWE Audace, Optimisation d'un système d'alimentation en eau potable utilisant EPANET comme outil d'aide pour la prise de décision, UB, ITS, 2009
2. MUHAYE Sadia, aménagement des marais agricoles inondables par la maitrise hydraulique des cours d'eau a faible pente : cas de la rivière Kajeke, UB, FSA, 2009
3. MANIRAKIZA Mathias, régulation hydrologique des précipitations des sous bassins versants de la commune gihanga, UB, FSA, 2009

III. Sites web

1. **http : //www.wikipedia.org**
2. **http : //www.veoliaeau.com**
3. **http: //www. Fao.org.**
4. **http: //www.fao.com.**