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

Potentialités acquifères de la plaine de la Rusizi (au nord du lac Tanganyika)

Hakiza, Gaston

2002
UB, ULg
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/840

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

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté des Sciences Appliquées

POTENTIALITES AQUIFERES DE LA PLAINE DE LA RUSIZI

(au Nord du lac Tanganyika)

par

Gaston Hakiza

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Appliquées

Jury :

Professeur E.Pirard (Université de Liège) : Président
Professeur A.Monjoie (Université de Liège) : Promoteur
Professeur A.Dassargues (Université de Liège)
Professeur V.Hallet (Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur)
Professeur J.Mudry (Université de Franche-Comté à Besançon)
Dr. L.Tack (Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervueren)

ANNEE ACADEMIQUE 2001 - 2002





A mon père *Joseph Hakiza*
A mon épouse *Persille Mwidogo*

A mes enfants *Juste Jimbere*
Kessy Kein Nineza
Sheila Ingabire
Champ Donel Girabantu

C'est à la mémoire des regrettés : ma mère Marie Barayugubwa, ma sœur Cassilde et mon frère Léonard Hakiza qui m'ont quitté si tôt, ainsi qu' à Salvator Sakubu, ancien collègue au Ministère de l'Energie et des mines, à l'Université du Burundi et doctorant aux L.G.I.H., et mon beau frère Herménégilde Ruhezamihigo qui m'encouragèrent à entreprendre mes études doctorales, que je dédie cette thèse.

Remerciements

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis de témoigner ici ma profonde reconnaissance à tous ceux et celles à qui je dois d'avoir mené à bien mes recherches.

Ma gratitude est particulièrement vive à l'égard du Professeur A. Monjoie, Directeur des Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'hydrogéologie et de prospection géophysique (L.G.I.H), qui m'a accueilli dans son service, m'a fait bénéficier de sa grande compétence en dirigeant cette thèse, en a contrôlé avec rigueur chaque étape de déroulement, jusqu'à son stade ultime. Qu'il veuille accepter également tous mes remerciements pour la patience et la compréhension, qu'il m'a toujours témoignées tout au long de ma formation.

Ma gratitude ira également au Dr. L.Tack, ancien Professeur à l'Université du Burundi, actuellement Chef de travaux agrégé au Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC), pour la mise à ma disposition de nombreux documents portant sur la géologie et l'hydrogéologie du Burundi. Il a également accepté de faire partie du jury. Je lui en suis reconnaissant.

Monsieur A.Dassargues, Professeur aux Universités de Liège et de Louvain, m'a enseigné les bases de la modélisation mathématique des nappes ainsi que l'optimisation des données géologiques par le traitement géostatistique. Les discussions scientifiques que j'ai eues avec lui aux diverses étapes de ma thèse m'ont été d'une grande utilité. Je lui en remercie.

Monsieur V.Hallet, Professeur aux Facultés Universitaires Notre Dame de la Paix de Namur a accepté spontanément de lire le manuscrit, le corriger et me donner des remarques et observations. Mille excuses pour le temps qu'il m'a consacré, souvent jusqu'aux heures tardives de la soirée, lorsqu'il était encore aux L.G.I.H. Je lui en suis très reconnaissant.

Je remercie également le Professeur E.Pirard de l'Université de Liége pour avoir accepté la présidence du Jury de cette thèse, et J.Mudry, Professeur à l'Université de Franche-Comté à Besançon, pour avoir accepté de faire partie du jury .

Ma respectueuse reconnaissance ira aux autorités de mon pays, particulièrement à l'Université du Burundi pour la bourse qui m'a été octroyée dans le cadre de la coopération bilatérale entre le Burundi et la Belgique, aux Ministères de la géologie et des mines, de l'agriculture et de l'élevage ainsi qu'aux institutions scientifiques (IGEBU et ISABU) pour les données qu'ils m'ont fournies. Je remercie particulièrement Messieurs M. Sebahene et D. Baransamaje, respectivement Directeur général de la géologie et des mines et ancien Directeur des projets à la Direction générale de l'énergie, pour les facilités qu'ils m'ont accordées lors de mes fréquents séjours au Burundi.

Que Mademoiselle F.Seynave, qui a assuré mon encadrement auprès de l'organisme financier (A.G.C.D) pour que cette thèse se fasse dans les meilleures conditions, trouve ici ma gratitude.

Le climat d'entente et de franche collaboration qui règne aux LGIH fait de ce service un cadre privilégié de recherche. Que son personnel scientifique et technique, qui m'a offert son soutien, reçoive mes vifs remerciements.

Je remercie Serge Brouyère et Guy Carabin pour les discussions fréquentes que j'ai eues avec eux lors de l'utilisation du logiciel GMS pour la modélisation mathématique de la nappe de la basse Rusizi, et Céline Rentier lors du traitement géostatistique de données.

Merci à Cristina Popescu, Ingrid Ruthy, Valérie Peters et Radu Gogu pour les divers échanges, les mots d'encouragement et la marque d'intérêt qu'ils ont témoigné à mon travail.

J'exprime ma reconnaissance à Messieurs R.Thiry et P.Jacques du service de dessin aux LGIH, qui m'ont aidé dans la mise en forme de nombreuses figures.

J'assure aussi ma reconnaissance au Secrétariat du Professeur A.Monjoie : Mesdames M.Bruninx, M.Bauduin, et Mademoiselle M.Ponsen, pour l'accueil toujours chaleureux qu'elles m'ont réservé et l'aide technique qui m'a été fournie chaque fois que de besoin.

Mesdames F.Michel et Simone Nibona ont accepté spontanément de relire le manuscrit de cette thèse, un domaine « hermétique » pour elles, et Godefroid Ndayikengurukiye m'a donné un coup de main lors de la mise en page de cette thèse. Je leur adresse mes remerciements.

Que les familles Aloys Ndayisenga, Albert Nibona, Athanase Gahungu, Raymond Yengayenge et Canisius Ntahe, ainsi que Nicodème Ntamahungiro et Sœur Salomée Ndonse trouvent ici le témoignage de notre profonde gratitude pour leur soutien indéfectible qu'ils nous ont apporté, à moi et ma famille, durant de longues années.

Que tous ceux et toutes celles qui m'ont aidé dans ce travail et que j'aurais oublié de citer, me pardonnent et acceptent ma reconnaissance.

Enfin, j'aurais peut-être dû commencer par là, il m'est difficile de trouver des mots justes pour remercier mon épouse et mes enfants qui, plus que tous les autres, ont subi, à des milliers de km, les aléas de mon long séjour en Belgique. N'eurent été les encouragements, la compréhension, la patience et les sacrifices qu'ils ont consentis, et cela pendant les moments particulièrement difficiles que connaît mon pays, ce travail n'aurait jamais pu aboutir. Tout simplement, merci.

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Signes, notations et abréviations

I. Introduction p 1

II. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique du Burundi

II.1. Localisation p 5

II.2. Géomorphologie p 5

II.2.1. Plaine de l'Imbo p 5

II.2.2. Crête Congo-Nil p 8

II.2.3. Plateaux centraux p 9

II.2.4. Dépression du Nord-Est p 9

II.2.5. Dépression du Moso p 9

II.3. Hydrographie p 10

II.3.1. Bassin du Congo p 10

II.3.2. Bassin du Nil p 10

II.4. Climat p 12

II.4.1. Pluies p 12

II.4.2. Températures p 14

II.4.3. Insolation p 14

II.4.4. Vents p 16

II.5 Géologie du Burundi p 16

II.5.1. Contexte régional p 16

II.5.1.1 Fossé du lac Tanganyika p 19

II.5.2. Contexte local p 32

II.5.2.1. Malagarazien p 34
II.5.2.2. Burundien p 35
II.5.2.3. Archéen p 35
II.5.2.4. Cénozoïque p 36

II.5.3. Révision du modèle d'évolution du segment NE de la chaîne Kibarienne p 36

II.5.4. Ages des roches magamtiques et des minéralisations au Burundi p 41

II.6. Pédologie p 42

II.7. Eaux souterraines p 48

II.7.1. Dans le substratum p 48

II.7.2. Nappes alluviales p 49

III. Synthèse des études antérieures des bassins orientaux de la Rusizi

III.1. Introduction p 51

III.2. Géologie des bassins p 52

III.2.1. Roches précambriennes p 52

III.2.1.1. Dans les contreforts de la plaine p 52

III.2.1.2. Dans la Crête Congo-Nil p 54

III.2.2. Magmatisme p 56

III.2.2.1. Granites p 56

III.2.2.2. Pegmatites p 56

III.2.2.3. Roches basiques p 57

III.3.Plaine de la Rusizi p.58

III.3.1. Plaine de la moyenne Rusizi p.59

III.3.1.1. Géomorphologie p.59

III.3.1.2. Stratigraphie p.65

III.3.1.3. Volcanisme p.68

III.3.1.4. Données géologiques p.70

III.3.1.5. Données hydrogéologiques p 77

III.3.2. Plaine de la basse Rusizi p 78

III.3.2.1. Géomorphologie p 78

III.3.2.2. Stratigraphie p 79

III.3.2.3. Sédimentologie p 79

III.3.2.4. Données géologiques et hydrogéologiques p.82

III.3.3. Conclusions p 122

IV. Paramètres hydrométéorologiques du bassin de la Rusizi

IV.1. Généralités p 133

IV. 2. Données pluviométriques p 135

IV.2.1. Plaine de la Rusizi p 135

IV.2.2. Contreforts et crête Congo-Nil p 138

IV.2.3. Régime pluviométrique du bassin de la Rusizi p 140

IV.3. Températures p 142

IV.3.1. Plaine de la Rusizi p 142

IV.3.2. Contreforts et crête p 144

IV.4. Humidité relative p 147

IV.5. Insolation p 149

IV.6. Vitesse du vent p 150

IV.7. Paramètres du bilan p 150

IV.7.1. Méthodes de calcul de l'ETP p 151

IV.7.1.1. Formule de Thornthwaite p 151

IV.7.1.2. Formule de Turc p 152

IV.7.1.3. Formule de Serra p 153

IV.7.1.4. Formule de Penman p 154

IV.7.2. Evaluation des paramètres p 155

IV.7.2.1. Basse Rusizi p 156

IV.7.2.2. Moyenne Rusizi p 157

IV.7.2.3. Crête Congo-Nil p 159

IV.8 Discussions sur les paramètres du bilan p 160

V. Bilans hydrologiques des bassins versants Orientaux de la Rusizi

V.1. Généralités p 165

V.2. Caractéristiques physiographiques p 167

V.3. Pluviométrie des bassins p 168

V.3.1. Pluviométrie mensuelle p 169

V.3.2. Pluviométrie annuelle p 171

V.4. Caractéristiques de l'écoulement p 172

V.5. Paramètres climatiques des bassins p 177

V.5.1. Evapotranspiration p 177

V.5.2. Stock d'humidité du sol p 179

V.5.3. Eau utile p 180

V.6 Bilans hydrologiques p 182

V.6.1. Bassin de la Nyakagunda p 182

V.6.1.1. Bilans annuels p 184

V.6.1.2. Estimation des réserves p 186

V.6.2. Bassin de la Nyamagana p 189

V.6.2.1. Bilans annuels p 190

V.6.2.2. Estimation des réserves p 193

V.6.3. Bassin de la Muhira p 195

V.6.3.1. Bilans annuels p 196

V.6.3.2. Estimation des réserves p 199

V.6.4. Bassin de la Kaburantwa p 202

V.6.4.1. Bilans annuels p 174

V.6.4.2. Estimation des réserves p 204

V.6.5. Bassin de la Kagunuzi p 206

V.6.5.1. Bilans annuels p 207

V.6.6. Bassin de la Mpanda p 209

V.6.6.1. Bilans annuels à Gatura p 211

V.6.6.2. Estimation des réserves à Gatura p 214

V.6.6.3. Bilans annuels à l'axe D p 215

V.6.6.4. Estimation des réserves à l'axe D p 218

V.6.7. Conclusion p 219

VI. Caractéristiques hydrogéologiques de la basse Rusizi

VI.1. Définitions p 221

VI.2. Méthodes d'interprétation des essais de pompage p 225

VI.2.1. Méthode de Dupuit p 225

VI.2.1.1. Nappe libre p 226

VI.2.1.2. Nappe captive p 229

VI.2.2. Méthode de Theis p 230

VI.3. Conductivités hydrauliques et transmissivités de la basse Rusizi p 237

VI.3.1. Conductivités hydrauliques p 237

VI .3.2. Transmissivités p 243

VI.4 Conclusion p 248

VII.Traitement géostatistique des conductivités hydrauliques de la basse Rusizi

VII.1. Introduction p 249

VII.2. Approche géostatistique de la variabilité spatiale p 249

VII.2.1. Hypothèse de stationnarité p 250

VII.2.2. Hypothèse d'ergodicité p 251

VII.2.3. Hypothèse intrinsèque p 251

VII.3. Equations du Krigeage p 255

VII.4. Krigeage des conductivités hydrauliques de la basse Rusizi p 257

VII.4.1. Préparation de données p 257

VII.4.2. Construction des variogrammes p 259

VII.4.3. Validation et choix du modèle p 261

VII.4.4. Répartition spatiale des conductivités hydrauliques p 264

VII.4. Conclusion p 267

VIII. Modélisation de la nappe de la basse Rusizi

VIII.1. Introduction p 269

VIII.2. Equation généralisée de l'écoulement p 270

VIII.2.1. Loi de Darcy p 270

VIII.2.2. Equation de continuité p 272

VIII.2.3. Conditions aux frontières p 273

VIII.3 Méthodes de résolution p 278

VIII.4 Modèle de la nappe de la basse Rusizi p 282

VIII.4.1.Hypothèses de travail p 282

VIII.4.2. Logiciels utilisés p 283

VIII.4.3. Extension du modèle p 284

VIII.4.4.Conditions aux limites p 284

VIII.4.5. Discrétisation du modèle p 285

VIII.4.6. Données du modèle p 288

VIII.4.7 Calibration du modèle p 288

VIII.4.8. Validation du modèle p 305

VIII.4.9.Résultats du modèle p 309

IX. Conclusions générales p 315

Annexes

Annexe I : Description géologique des forages p 319

Annexe II : Pluviométrie p 369

Annexe III : Températures p 377

Annexe IV : Débits des rivières p 387

Annexe V : Evapotranspiration, stock d'humidité et eau utile p 391

Annexe VI : Courbes de tarissement p 407

Bibliographie p 433

Signes, notations et abréviations

Dans la liste qui suit sont repris les signes, notations et symboles utilisés, le chapitre et le paragraphe de leur première apparition.

A ,	section perpendiculaire à l'écoulement, (VI.1.)
a ,	albedo de la surface évaporante, (IV.7.)
a ,	portée d'un variogramme, (VII.3.)
B ,	facteur de drainance (VI.2.)
B_i ,	section d'écoulement de la couche (VI.1.)
b' ,	épaisseur de la couche semi-perméable (VI.2.)
C(d) ,	covariance, (VII.2.)
d ,	distance entre les points, (VII.2.)
d ,	diamètre moyen des grains, (VIII.2.1.)
e ,	épaisseur du matériau aquifère, (VI.1.)
e ,	épaisseur de la section, (VI.2.)
e ,	tension de la vapeur d'eau mesurée sous abri, (IV.7.)
e_w ,	tension maximale de la vapeur d'eau, (IV.7.)
ETP,	évapotranspiration potentielle, (IV.7.)
ETR ,	évapotranspiration réelle, (IV.7)
Eu ,	eau utile, (IV.7.)
F'_T ,	pente de la courbe des tensions de vapeur saturante, (IV.7.)
GEO-EAS ,	Geostatistical Environmental Assessment Software, (VII.)
GEORIFT	Géologie du Rift Est-Africain (II.5)
GMS ,	Groundwater Modeling System, (I)
g ,	accélération gravitationnelle, (VI.1.)
GEOMAC ,	Géoressources, Géotechnologies et matériaux de construction (en couverture)
H ,	durée maximale d'insolation, (IV.7.)
H ,	hauteur d'eau lue à l'échelle des stations limnimétrique, (V.4.)
H,	hauteur piézométrique initiale, (VI.2.)
h ,	durée réelle d'insolation, (IV.7.)
h ,	hauteur d'eau dans le puits, (VI.2.)
h ,	hauteur piézométrique , (VIII.2.)
h_{ca} ,	hauteur piézométrique calculée par le modèle, (VIII.4.)
h_{me} ,	hauteur piézométrique mesurée, (VIII.4.)
h_s ,	niveau des eaux de surface, (VIII.2.)
i ,	indice thermique mensuel, (IV.7.)
I ,	indice thermique annuel, (IV.7.)
i ,	gradient hydraulique, (VI.1.)
I_m ,	indice d'aridité mensuel, (IV.2.)
Ig ,	radiation solaire globale, (IV.7.)
Iga ,	radiation solaire (en l'absence d'atmosphère) (IV.7.)
IGEBU ,	Institut Géographique du Burundi (I)
IGN ,	Institut géographique national (France) (I)
ISABU,	Institut des Sciences Agronomiques du Burundi, (I)
K,	indice de compacité de Gravelius, (V.2.)

K,	conductivité hydraulique (VI.1.)
k,	perméabilité intrinsèque du milieu poreux (VI.1.)
$\underline{\underline{K}}$,	tenseur des perméabilités du milieu, (VIII.2.)
K',	perméabilité de la couche semi-perméable, (VI.2.)
K',	conductivité hydraulique de la couche semi-perméable, (VIII.2.)
L ,	longueur du rectangle équivalent, (V.2.)
L ,	longueur de l'échantillon, (VI.1.)
l,	largeur du rectangle équivalent, (V.2.)
LGIH,	Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de prospection géophysique , Université de Liège, (I)
MRAC,	Musée Royal de l'Afrique Centrale, (I)
n ,	porosité totale, (VI.1.)
n ,	nombre total de mesures (VII.3.)
n_e ,	porosité efficace, (VI.1.)
n ,	vecteur unitaire normal à la frontière, (VIII.2.)
P,	périmètre du bassin, (V.2.)
P,	pluviométrie, (V.6.)
p ,	pression du fluide, (VIII.2.)
Probe	Proto-Rifts and Ocean Basin Evolution (II.5)
Q ,	débit, (V.4.)
Q_0,	débit au temps t_0 , (V.6.)
q,	débit par unité de volume du fluide échangé par l'EVR, (VIII.2.)
q_Δ,	débit spécifique, (VI.2.)
R,	rayon d'influence, (VI.2.)
r ,	rayon efficace du puits, (VI.2.)
Re,	nombre de Reynolds en milieu poreux, (VIII.2.)
S ,	stock d'humidité du sol, (IV.7.)
S ,	surface du bassin, (V.2.)
S ,	coefficient d'emmagasinement, (VI.1.)
S H E R	Société pour l'Hydraulique et l'Equipement Rural
S_s,	coefficient d'emmagasinement spécifique, (VIII.2.)
T,	température (IV.7.)
t ,	temps, (VIII.3.)
V,	vitesse moyenne du vent, (IV.7.)
V,	volume d'eau, (V.4.)
$\underline{v}$,	flux spécifique du fluide, (VIII.2.)
$\underline{v_e}$,	vitesse réelle d'écoulement, (VIII.2.)
v_D,	vitesse de Darcy, (VI.1.)
Z ,	variable, (VII.2.)
Z^*,	variable estimée, (VII.3)
Z ,	altitude (VIII.2.)
z_1 ,	cote de la base de l'aquifère (VIII.2.)
z_2 ,	cote du sommet de l'aquifère (VIII.2.)
α ,	coefficient de tarissement, (V.6.)
α ,	coefficient de compressibilité du milieu poreux, (VIII.2.)
α , β ,	paramètres liés à la latitude et à l'époque de l'année (IV.7.)

β,	coefficient de compressibilité du fluide, (VIII.2.)
γ,	constante psychrométrique (IV.7.)
τ,	demi amplitude de variation des températures extrêmes (IV.7.)
γ,	constante d'Euler, (VI.2.)
γ (d),	variogramme (fonction de la distance), (VII.2.)
Δ,	rabattement, (VI.2.)
Δh,	différence de charge, (VI.1.)
ΔR,	variation annuelle des réserves d'eau souterraine, (V.6.)
ΔS,	variation de stock d'humidité du sol, (V.6.)
Δt,	pas de temps, (VIII.3.)
$\delta(d)$,	symbole de Kronecker, (VII.2.)
ε,	écart de fermeture des bilans, (V.6.)
ε_m,	degré hygrométrique de l'air (IV.7.)
λ_0^i,	facteur de pondération, (VII.3.)
μ,	viscosité dynamique du fluide, (VI.1.)
ρ,	masse volumique du fluide, (VI.1.)
ρ,	masse volumique du fluide, (VIII.2.)
σ,	constante de Stephan-Boltzman (IV.7.)
θ,	paramètre d'intégration temporelle, (VIII.3.)
$W(u)$,	fonction exponentielle intégrale, (VI.2.)
ω,	seuil d'un variogramme, (VII.3.)

I. Introduction

La plaine de la Rusizi, objet de notre étude, fait partie de la branche occidentale du Rift Est Africain. Elle est située au Nord du lac Tanganyika, à cheval entre le Burundi et la République Démocratique du Congo (ex. Zaïre) . Elle s'étend entre les parallèles 2°42' S et 3°24'S et les longitudes 29° et 29°22'E.

Au Nord, la plaine est limitée par les coulées basaltiques de la province volcanique du Sud-Kivu, au Sud par le lac Tanganyika, à l'Est par les contreforts de la crête Congo-Nil qui culmine à 2665 m et, à l'Ouest par les escarpements congolais des monts Mitumba, avec le plateau de l'Itombwe qui culmine à 3200 m d'altitude. Du point de vue topographique, la plaine est comprise entre 774 m (niveau du lac Tanganyika) et 1000 m à la limite des contreforts.

La plaine tire son nom de la rivière Rusizi , exutoire du lac Kivu, qui la traverse du Nord au Sud avant de se jeter dans le lac Tanganyika. En tant qu'effluent du lac Kivu et affluent du lac Tanganyika, la rivière fait partie du système mis en place à une période récente (fin Pléistocène), à la suite de l'éruption du massif volcanique des Virunga au Nord du lac Kivu. Ce massif a entraîné une perturbation au niveau du réseau de drainage du fleuve Nil , la formation du lac Kivu et son écoulement en direction du lac Tanganyika.

Plusieurs études pédologiques, hydrologiques, géologiques et hydrogéologiques ont été réalisées dans cette région depuis 1950, en raison du contexte géographique et socio-économique de la région.

En effet, la topographie de la plaine est propice à l'irrigation, ses riches terres agricoles, sa proximité par rapport à la ville de Bujumbura, une population moins dense comparée aux autres régions avoisinantes ont poussé les autorités à monter des projets de développement dans cette région afin de subvenir aux besoins alimentaires du pays et tenter de désengorger les régions de montagnes fortement peuplées.

La mise en valeur de la plaine a commencé avec l'implantation de paysannats cotonniers par l'Administration belge. Dans la plaine de la basse Rusizi, des pistes distantes de 1260 m et traversant la plaine d'Est en Ouest furent tracées. Afin de pouvoir suppléer à la carence d'eau due à la faible pluviosité de la région, de nombreux forages hydrologiques furent implantés le long de ces transversales par le Service Géologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi.

Au début des années 1960, tout le domaine aménagé pour les paysannats était occupé et utilisé, mais après quelques années, une grande partie des paysannats fut abandonnée à cause de très mauvaises conditions climatologiques durant cette période. Il y eut des inondations et une prolifération du paludisme entraînant une dégradation de l'état de santé de la population et une diminution de la production, ce qui incita les agriculteurs à retourner dans les villages de

montagnes. Ainsi, des infrastructures aménagées furent abandonnées et beaucoup de forages d'eau se sont bouchés faute d'entretien.

A partir de 1968, le gouvernement du Burundi a commencé à concevoir des projets de réaménagement des paysannats de la plaine de la basse Rusizi, mais la faible pluviosité avec une longue saison sèche constitue encore aujourd'hui un des problèmes cruciaux à résoudre car elle freine l'exploitation agricole de cette région réputée fertile.

Alors que l'irrigation des cultures est en partie satisfaite par des prises en rivières réalisées en amont de la plaine, il en est autrement pour ce qui est de l'eau potable. La population de la région est obligée de parcourir de longues distances à pied ou à vélo pour s'approvisionner en eau de rivière. L'exploitation des nappes situées à proximité des paysannats constituerait sans nulle doute un énorme avantage pour la population de la région.

La présente étude constitue une contribution à l'étude de ces nappes. Elle prend appui sur de nombreuses données hydrologiques, géologiques sédimentologiques et pédologiques recueillies aussi bien dans la plaine que dans le bassin supérieur de la Rusizi .

De la réinterprétation de données géologiques, nous avons dégagé un schéma interprétatif de la structure tridimensionnelle de la géologie de la plaine et nous avons déterminé la configuration et la structure de la nappe.

L'analyse de données hydrométéorologiques de la plaine a confirmé et quantifié le grand déficit hydrique de cette région justifiant ainsi la nécessité de recourir aux nappes souterraines.

L'étude hydrologique de six bassins versants de la Rusizi nous a conduit à l'établissement des bilans hydrogéologiques et à estimer la part d'eau qui contribue à l'alimentation des nappes de la plaine.

Les essais de pompage réalisés dans près de 100 forages nous ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, à savoir les perméabilités et les transmissivités. La répartition spatiale de ces paramètres a été estimée par interpolation sur toute la zone. A partir des niveaux de l'eau dans les différents forages, une carte piézométrique de la basse Rusizi a été dressée.

Les résultats obtenus lors de précédentes étapes nous ont servi à l'élaboration d'un modèle mathématique de la nappe aquifère de la basse Rusizi. Ce modèle a permis de caractériser les zones mal connues du point de vue hydrodynamique, de déterminer les zones propices à l'implantation de forages hydrogéologiques et de quantifier les échanges de la nappe avec la rivière Rusizi et le lac Tanganyika.

Pour mener notre étude, nous avons rassemblé de nombreuses données

provenant de plusieurs instituts :

- le Musée Royal de l'Afrique Centrale de Tervuren (MRAC) a mis à notre disposition les données géologiques et hydrogéologiques de base récoltées par le Service Géologique du Congo Belge et du Ruanda-Urundi ; le même service nous a fourni les cartes géologiques au 1/100.000 de la région ;

- l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) et l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) nous ont fourni les données hydrométéorologiques et hydrologiques ;

- pour la période 1972-1980, les données hydrologiques des principales rivières traversant la plaine de la Rusizi sont tirées du Rapport final de l'étude sur le potentiel hydroélectrique du Burundi élaborée par Lahmeyer International (R.F.A) ;

- les cartes topographiques existant au 1/50.000, réalisées par l'IGN (France) en collaboration avec l'IGEBU;

- les publications de nombreux chercheurs qui ont travaillé dans la région nous ont aidé à mieux comprendre la géologie de la plaine ; elles sont en grande partie consignées dans des rapports annuels du MRAC qui sont disponibles à l'unité de documentation des sciences de la terre de l'Université de Liège ;

- nous avons également consulté des rapports techniques de différents projets installés dans la région et archivés aux Ministères de l'Energie et des Mines, de l'Agriculture et de l'Elevage.

Au cours de l'élaboration de ce travail, nous avons bénéficié des logiciels spécialisés disponibles aux Laboratoires de géologie de l'ingénieur, d'hydrogéologie et de prospection géophysique (L.G.I.H) de l'Université de Liège.

Le traitement géostatistique des données hydrogéologiques a été facilité par le logiciel GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software).

Le logiciel GMS (Groundwater Modeling System) pré et post processeur pouvant être couplé avec le logiciel MODFLOW (A Modular three dimensional finite difference ground water - Flow Model) nous a grandement aidé dans l'élaboration du modèle mathématique de la basse Rusizi.

Notre thèse est structurée en neuf chapitres (cette introduction constitue le premier chapitre) :

Le deuxième chapitre comprend des considérations générales situant notre région d'étude dans le contexte géologique régional et local .

Le troisième chapitre est une synthèse de données bibliographiques reprenant les études antérieures qui ont été menées dans la plaine de la Rusizi, en particulier géologiques, sédimentologiques et hydrogéologiques.

Dans cette partie, notre propre contribution concerne l'établissement des coupes géologiques et la visualisation de la structure tridimensionnelle de la plaine à partir des nombreuses descriptions de forages.

Un schéma interprétatif de la géologie de la plaine de la basse Rusizi est présenté. Ce schéma a servi de base pour l'élaboration d'un modèle mathématique de cette partie de la plaine.

Au quatrième chapitre, nous présentons une analyse des paramètres hydrométéorologiques du bassin de la Rusizi.

Au cinquième chapitre, nous établissons au pas de temps mensuel, de 1972 à 1992, les bilans hydrologiques de six bassins versants de la Rusizi. Pendant la période où les débits journaliers sont connus, des courbes de tarissement ont été établies .

Le sixième chapitre comprend l'étude hydrodynamique de la nappe aquifère de la basse Rusizi. A partir des données des essais de pompage, nous avons déterminé les perméabilités et les transmissivités des différentes formations. Des cartes montrant la répartition spatiale de ces paramètres sont présentées.

Le septième chapitre comprend le traitement géostatistique de données. Dans le but de suppléer au manque de données dans les zones non explorées par les forages, un traitement géostatistique des perméabilités et des transmissivités a été effectué.

Le huitième chapitre prend appui sur les résultats obtenus aux chapitres précédents et propose un modèle mathématique de la basse Rusizi.

Enfin, le dernier chapitre expose les résultats auxquels nous sommes arrivés et les axes de recherche à explorer pour approfondir la connaissance des nappes aquifères de la plaine en vue de leur exploitation optimale et de leur protection contre toute source de pollution.

II. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique du Burundi

II.1. Localisation

Le Burundi se trouve dans la zone intertropicale entre 2°20' et 4°30' de latitude Sud et 28° 50' et 30°53' de longitude Est. C'est un pays enclavé et sans accès à la mer. Situé à quelques 1430 km de l'Océan Indien , 1900 km de l'Océan Atlantique, 3800 km de la mer Méditerranée et 3500 km du Cap , il se réclame être en bordure du lac Tanganyika, le « Coeur de l'Afrique » (fig.II.1).

Avec ses 27.834 km², le Burundi fait, avec son voisin du Nord, le Rwanda (26.000 km²), figure d'exception par rapport aux immenses pays : à l'Est et Sud la Tanzanie (941.550 km²) ; à l'Ouest la République Démocratique du Congo (ex-Zaïre) (2.245.410 km²).

La plaine de la Rusizi, objet de notre travail, s'étend de part et d'autre de la rivière Rusizi qui, avec le lac Tanganyika, forme la limite naturelle entre le Burundi et la R.D. du Congo.

II.2. Géomorphologie

L'altitude du Burundi varie entre 774 m, correspondant au niveau du lac Tanganyika, et 2670 m, point culminant au mont Heha. En fonction de l'altitude, le Burundi se distingue par cinq ensembles morphologiques (fig.II.2) :

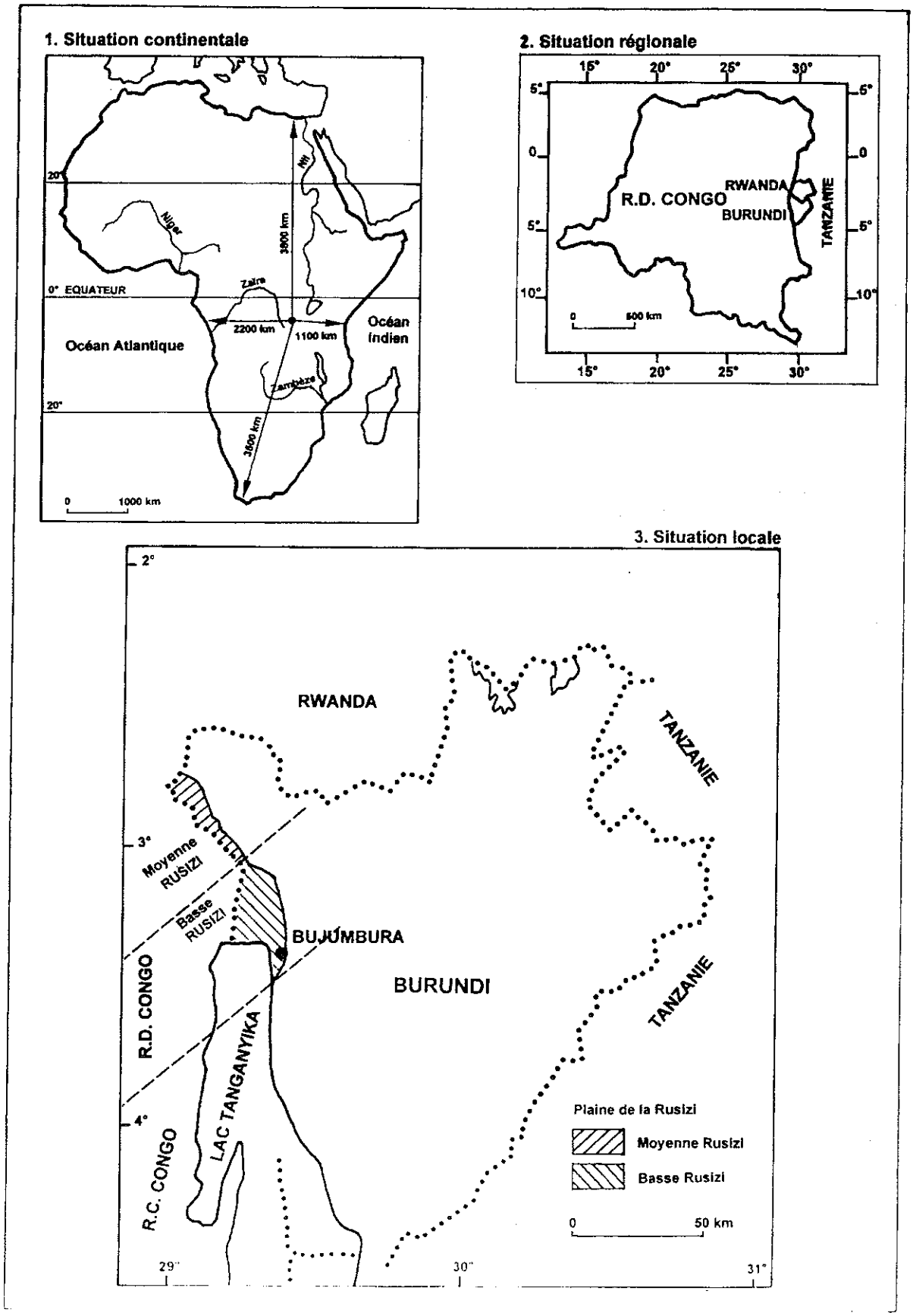
- la plaine l'Imbo,
- la crête Congo-Nil ;
- les plateaux centraux ;
- les dépressions du Nord-Est et ;
- les dépressions du Moso.

II. 2.1. Plaine de l'Imbo

La plaine de l'Imbo est comprise entre 774 et 1000 m d'altitude. Elle englobe la plaine de la Rusizi et les plaines riveraines du lac Tanganyika :

- la plaine de la Rusizi se développe au Nord du lac Tanganyika. D'extension variable, sa largeur oscille entre 4 et 10 km dans sa partie septentrionale et peut atteindre 25 km dans la partie méridionale ;

Figure II.1: SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BURUNDI



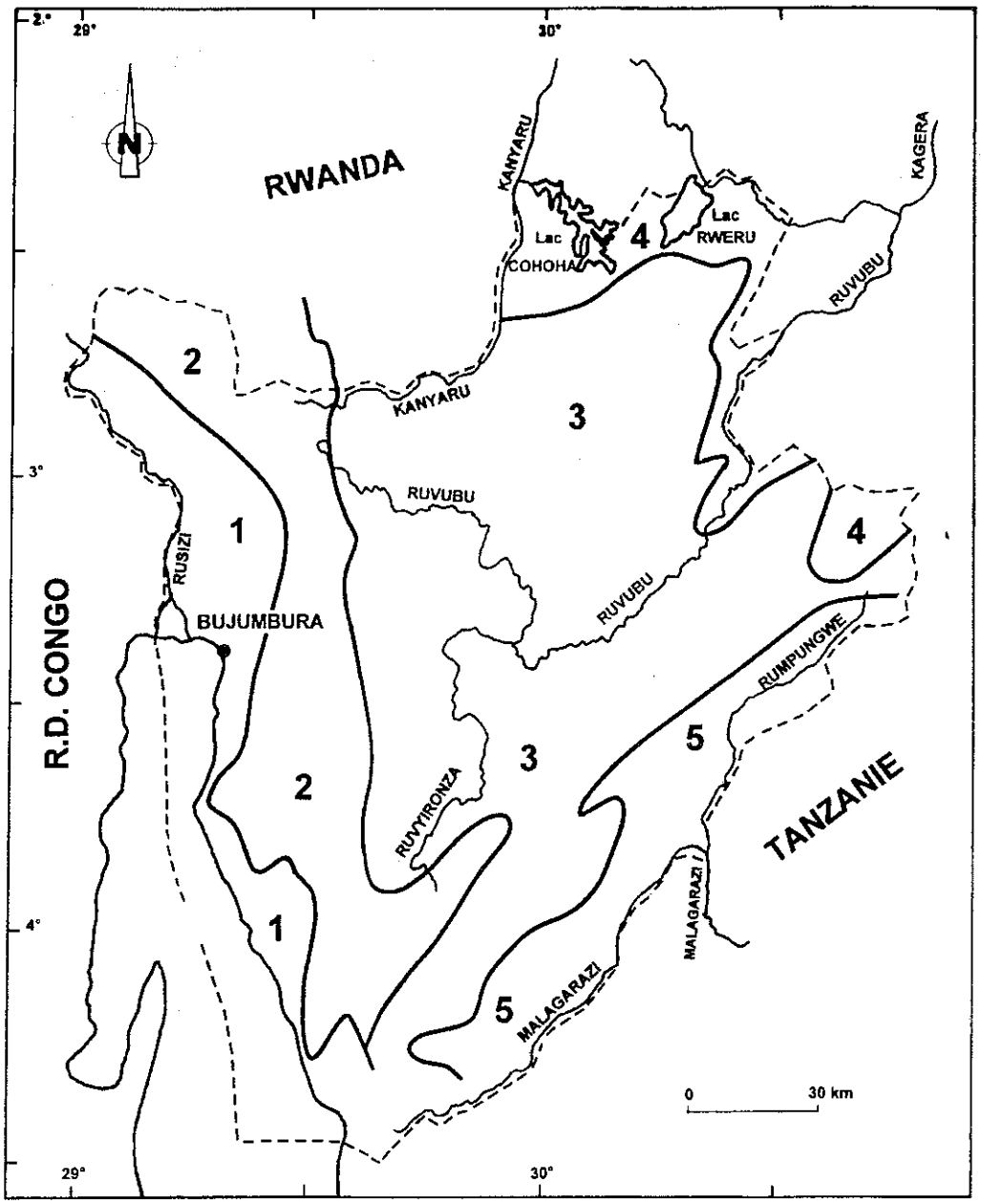


Figure II.2: GRANDS ENSEMBLES MORPHOLOGIQUES DU BURUNDI

1 La plaine de l' Imbo
2 La crête Congo-Nil
3 Le plateau central
4 Les dépressions du Nord-Est
5 Les dépressions du Moso

- les plaines riveraines du lac qui se développent au Sud de Bujumbura, le long du lac Tanganyika jusqu'à Nyanza-Lac. La topographie générale est dominée par une alternance de petites plaines sédimentaires, séparées par le prolongement des versants jusqu'au lac. Dans la régions de Rumonge et Nyanza-lac, ces plaines s'élargissent pour atteindre quelques kilomètres.

Les différents traits morphologiques de la plaine de la Rusizi sont liés aux variations du niveau du lac ainsi qu'à la mise en place de la Rusizi et de ses affluents. Plane au Sud, la plaine s'élève par paliers successifs vers le Nord et vers l'Est dans la zone des piedmonts. D'une largeur supérieure à 20 km au Sud, elle se rétrécit considérablement vers le Nord.

La ville de Bujumbura est bâtie au bord du lac Tanganyika ; elle s'étend au Nord dans la plaine de la Rusizi et au Sud dans la plaine riveraine du lac.

II.2.2. Crête Congo-Nil

La crête Congo-Nil est comprise entre 2000 et 3000 m d'altitude. C'est un massif montagneux allongé NNW-SSE, qui détermine la ligne de partage des eaux entre les bassins du Congo et du Nil.

Elle s'étire depuis le Sud de la chaîne volcanique des Virunga au Congo, traverse l'Ouest du Rwanda et du Burundi et se poursuit jusqu'en Tanzanie. Son altitude s'abaisse progressivement du Nord au Sud : les plus hauts sommets atteignent 2990 m aux abords des Virunga, 2650 à 2670 m au Burundi et 1850 m à la frontière entre la Tanzanie et le Burundi.

Cette chaîne de montagnes est constituée de roches indurées. Il s'agit de massifs principalement quartzitiques où les barres rocheuses sont parfois dénudées, les pentes raides et les têtes supérieures de vallées encaissées.

Les deux versants de la crête Congo-Nil sont différents du point de vue géomorphologique :

- les contreforts (ou Mumirwa), versant occidental de la crête Congo-Nil, présente une chute brutale de la montagne sur la plaine de l'Imbo ; il s'agit d'un abrupt de failles complexes. En quelques kilomètres, une dénivellation d'environ 1300 m est observée. Un réseau très dense de rivières torrentielles installées sur ces failles creuse des vallées aux versants à pentes raides. Ces versants très pentus et couverts d'un manteau de roche altérée peu épais, sont le siège d'importants glissements de terrain pendant la saison de pluie ;

- le versant oriental de la crête, appelé aussi versant nilotique, assure la transition entre les hauts massifs et les plateaux centraux ; il est moins faillé que la partie occidentale mais est fortement disséqué par les rivières. La partie

superficielle des roches est transformée en arène, qui résiste mal à l'érosion mécanique .

II.2.3. Plateaux centraux

Parallèles à la crête Congo-Nil, les plateaux centraux couvrent la plus grande partie du pays et s'étendent sur une largeur d'environ 100 km jusqu'aux dépressions de l'Est et du Nord du pays. Ils sont caractérisés par de nombreuses collines arrondies qui forment entre elles des vallées à fond plat favorisant souvent la formation de marécages. Ces collines ont valu au Burundi le surnom de « Pays des mille collines ». Les versants à forte pente bien arrosés et fortement déboisés, sont le siège d'une importante érosion mécanique suite au ruissellement et sont affectés par de fréquents glissements de terrain.

Dans les grandes vallées larges à fond plat (Ruvubu et ses affluents), la plaine alluviale, mal drainée, est couverte par d'immenses tourbières.

Vers le Sud, les plateaux centraux s'élèvent et se confondent avec la terminaison de la crête Congo-Nil, dans le secteur des sources du Nil.

II.2.4. Dépression du Nord-Est

La partie Nord-Est du Burundi présente un relief peu élevé compris entre 1200 et 1500 m d'altitude. Elle est caractérisée par de vastes vallées marécageuses dont certaines sont couvertes d'une végétation flottante dominée par des papyrus.

Les lacs Cohoha et Rweru, frangés de papyrus, confèrent un cachet très original au Nord du Burundi. La formation de ces lacs dans la dépression du Bugesera s'intègre dans le cadre géologique régional et représente la réponse à cette région au développement de la branche occidentale du Grand Rift de l'Est de l'Afrique. Son effondrement s'accompagne d'un relèvement de ses « épaules » à hauteur de l' « épaule » orientale du Rift, ce relèvement provoque un basculement vers l'Est , de la surface topographique ; le réseau hydrographique pré-rift s'écoulant généralement de l'Est vers l'Ouest, se voit imposé un ennoiement général des ses vers l'Ouest (Moeyersons, 1979 a ; 1979 b ; 1988 ; Rossi, 1980 ; Ollier, 1981 ; cités par L. Nkurikiye, 1989).

II.2.5. Dépression du Moso

La dépression du Moso est constituée d'une plaine étirée le long de la frontière tanzanienne et drainée par la Malagarazi, la Rumpungwe et leurs affluents. Elle s'étend au Sud-Est sur 100 km de longueur et 10 à 30 km de largeur.

Du point de vue géomorphologique, la plaine du Moso est entourée par des montagnes à l'Ouest . Plus au Sud, un escarpement vertical, taillé dans les calcaires et les grès, masque l'emplacement de la fracture principale, véritable mur dominant la région du Moso.

II.3. Hydrographie

Le Burundi est caractérisé par un grand nombre de cours d'eau et de marais. En plus du lac Tanganyika, il y a également les petits lacs du Nord, à la frontière avec le Rwanda.

L'originalité de l'hydrographie du Burundi réside dans le rôle que joue la crête Congo-Nil dans le partage des bassins versants. Elle appartient à deux bassins majeurs : le bassin du fleuve Congo et le bassin du Nil.

II.3.1. Bassin du Congo

Les rivières qui alimentent le bassin du Congo se jettent toutes dans le lac Tanganyika d'une superficie 31900 km². Quatre pays sont riverains du lac : le Burundi, la R.D. du Congo, la Tanzanie et la Zambie. La rivière Rusizi, exutoire du lac Kivu, est son plus grand affluent.

Au Burundi, le bassin du Congo comprend deux parties (fig.II.3) :

- la première partie située à l'Ouest de la crête qui comprend d'une part la Rusizi et ses affluents, d'autre part les cours d'eau qui se jettent directement dans le lac Tanganyika ;

- la deuxième est constituée par la Malagarazi et ses affluents. Cette rivière, alors qu'elle prend sa source à moins de 20 km du lac Tanganyika, atteint ce dernier au Sud de Kigoma (en Tanzanie) après un parcours de plus de 500 km.

II. 3.2. Bassin du Nil

Le bassin du Nil est constitué de nombreux affluents dont les eaux sont drainées à travers deux grandes rivières : la Ruvubu et la Kanyaru.

La Ruvubu, avec une longueur de 265 km à l'intérieur du Burundi, est le cours d'eau le plus important. Elle quitte le territoire burundais par le Nord-Est à la frontière avec la Tanzanie.

La Kanyaru draine le reste du bassin ; elle forme la frontière avec le Rwanda sur une longueur de 100 km. Une partie de ce réseau hydrographique comprend les lacs situés au Nord du Burundi qui sont les lacs Cohoha, Rweru, Rwihinda ou lac aux oiseaux et Kanzigiri.

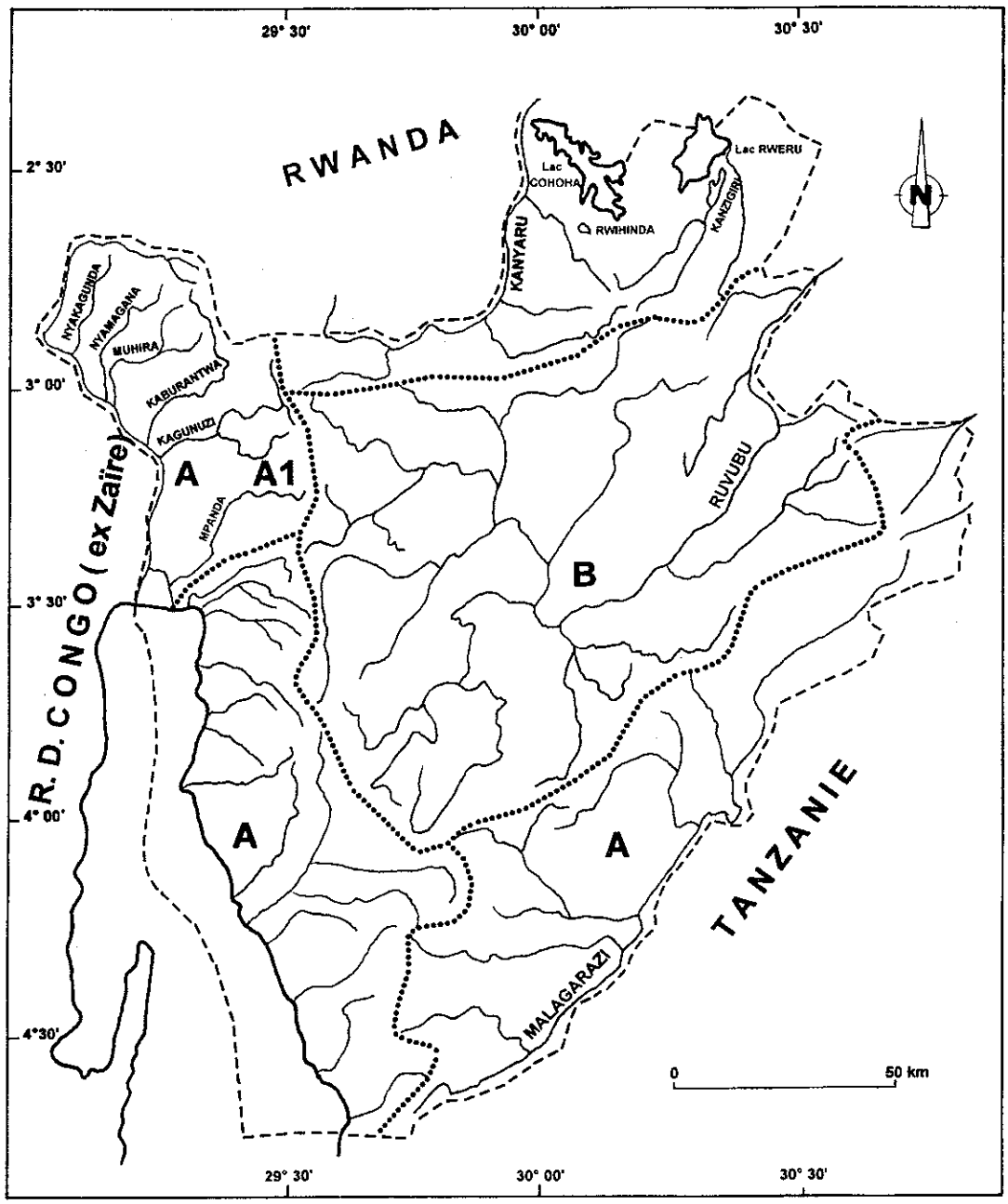


Figure II.3: RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BURUNDI

A Bassin du lac TANGANYIKA
B Bassin du NIL
A1 Bassin de la RUSIZI

Source : IGEBU

La Kanyaru est l'affluent principal de la Rivière Nyabarongo (au Rwanda) qui croise la Ruvubu pour former la Kagera qui à son tour, se jette dans le lac Victoria et, de là, alimente le Nil.

II. 4. Climat

La position en latitude, entre 2°20' et 4°30', son relief (la majeure partie du pays se situe au dessus de 1500 m) et sa situation géographique à la charnière de l'Afrique centrale et l'Afrique orientale confèrent au Burundi un climat tropical mais tempéré par l'altitude du point de vue thermique.

II. 4.1. Pluies

Le Burundi apparaît comme une région très contrastée, comprenant des secteurs très arrosés sur la crête Congo-Nil et des secteurs très secs tels que la plaine de la Rusizi et les dépressions du Nord et du Nord-Est (fig.II.4)

Malgré une latitude équatoriale, les pluies ne tombent pas toute l'année et une saison sèche se marque plus ou moins nettement, selon les endroits. La répartition des précipitations dépend en grande partie de la position en altitude, mais aussi de l'exposition des régions aux vents pluvieux. Les totaux annuels des précipitations varient énormément d'un endroit à l'autre du pays.

La crête Congo-Nil (zones 6,7 et 8) est la région la plus arrosée du Burundi. Dans la région septentrionale de la crête, au niveau de la forêt de la Kibira, les précipitations moyennes annuelles peuvent atteindre plus de 2000 mm (zone 8).

Le plateau central (zone 4) enregistre une pluviométrie oscillant entre 1200 et 1400 mm.

La plaine de l'Imbo avec une pluviométrie annuelle comprise entre 800 et 1000 mm, la plaine de la dépression du Moso (1100 à 1200 mm) et les dépressions du Nord-Est du Burundi (800 à 1100 mm), sont les régions les moins arrosées du pays.

La répartition des pluies au cours de l'année est caractérisée par l'alternance de la saison sèche et de la saison des pluies. Les premières pluies arrivent généralement au mois de septembre . Jusqu'en avril, tous les mois reçoivent des précipitations avec des intensités variant selon les régions. En mai, les pluies deviennent très irrégulières, ce qui marque le début de la saison sèche qui s'étale au moins sur trois mois dans toutes les régions du Burundi.

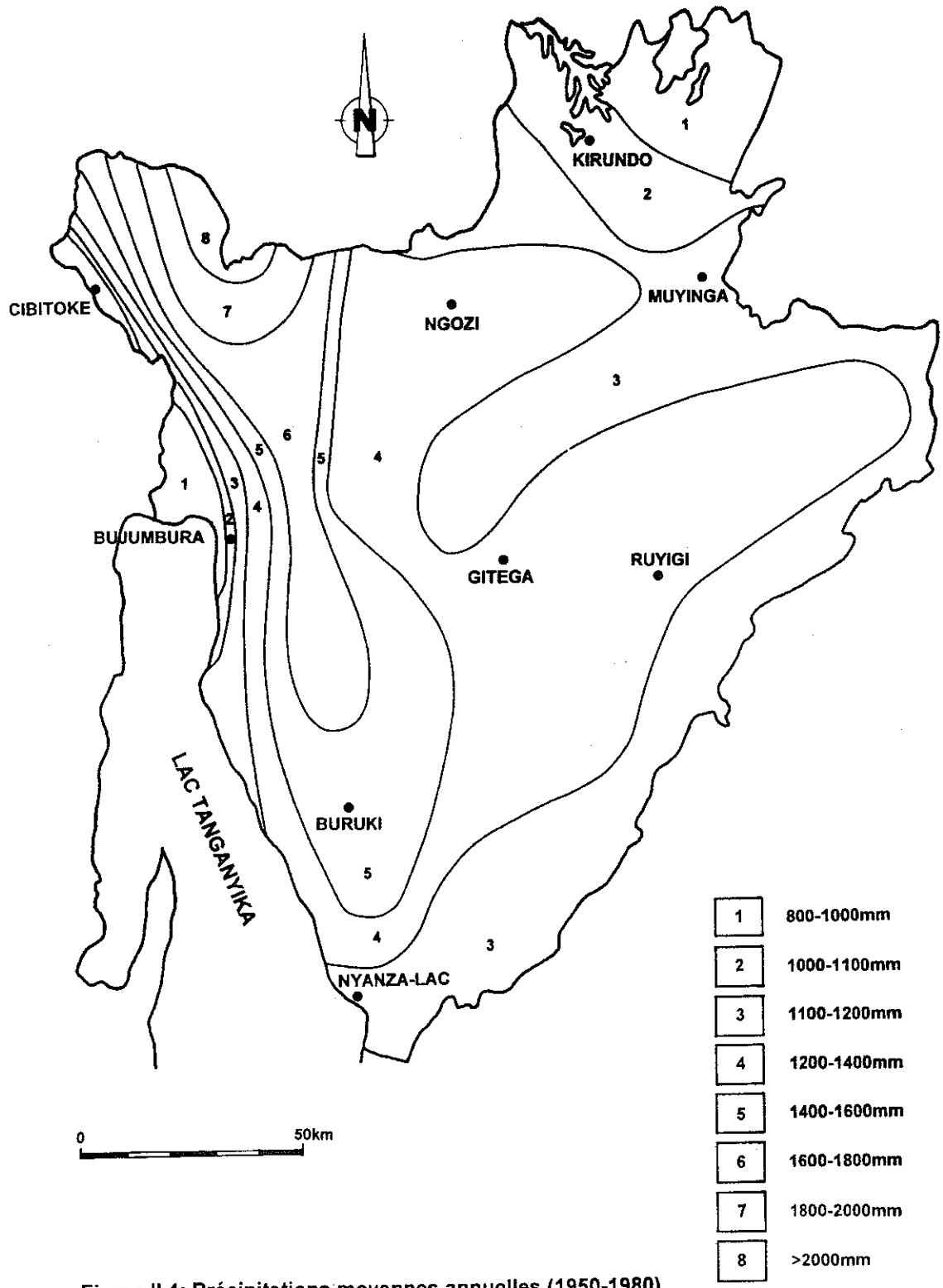


Figure II.4: Précipitations moyennes annuelles (1950-1980)
Source IGEBU

II.4.2. Températures

Comme les précipitations, les variations de température sont fonction de l'altitude . La figure II.5 montre les isothermes moyennes sur le territoire du Burundi.

La région de l'Imbo (zone 1) ,comprenant la plaine de la Rusizi et les plaines riveraines du Tanganyika, est la plus chaude du Burundi avec des températures moyennes annuelles supérieures à 23°C, pour des altitudes comprises entre 774 et 1000 m.

Les contreforts, le Moso et les dépressions du Nord (zone 2), enregistrent des températures variant entre 19 et 23°C.

Les plateaux centraux (zone 3) enregistrent des températures variant entre 17 et 19°C.

Les régions de haute altitude correspondant à la crête Congo-Nil (zone 4) sont caractérisées par de basses températures avec des moyennes annuelles inférieures à 17°C, pouvant même descendre en dessous de 15°C dans sa partie septentrionale (zone 5).

Le climat connaît une faible variation des températures moyennes mensuelles au cours de l'année : les amplitudes annuelles très peu élevées :1°C sur la crête et 3°C dans le Moso. La faiblesse des amplitudes est très marquée sur la crête.

Dans la plaine de l'Imbo et le Moso, les températures maximales extrêmes peuvent atteindre 30°C. Sur la crête, les températures minimales extrêmes peuvent descendre en dessous de 5°C.

II.4.3. Insolation

L'insolation est fonction de la présence des nuages, brouillards et pluies et suit donc le rythme de la pluviosité. Les mois les plus ensoleillés sont les mois secs, où pluie et nébulosité sont moins importantes, avec des maxima très nets de juillet à août et des minima de novembre à avril. La durée annuelle de l'insolation est importante dans les régions de l'Imbo (Bujumbura-aéroport : 2444,5 heures/an) et du Moso (Musasa : 2372,5 heure/an).

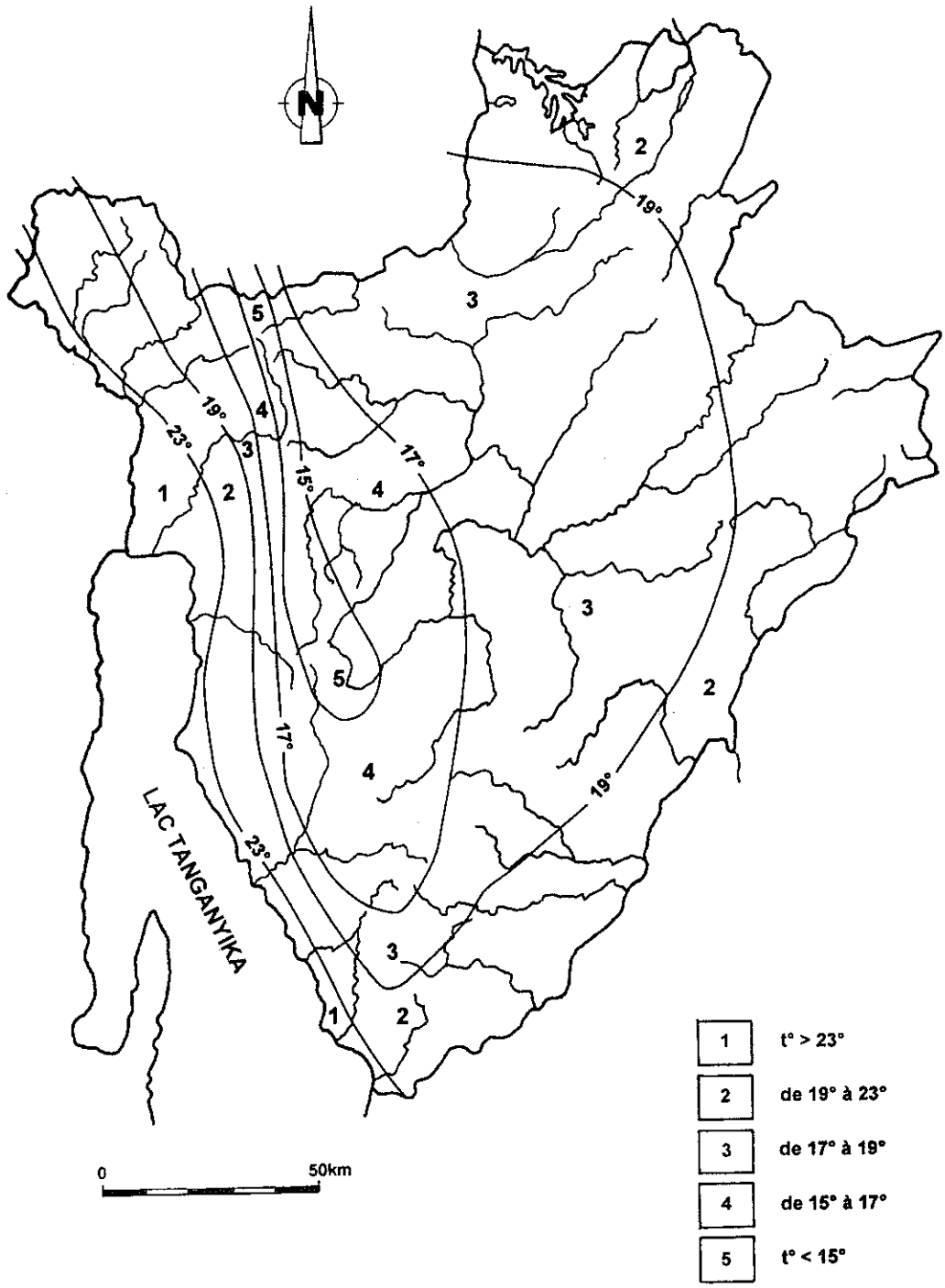


Figure II.5: Carte des isothermes moyennes

Source: Atlas du Burundi, 1979

II.4.4. Vents

L'ensemble du territoire du Burundi est soumis à l'influence des alizés du Sud-Est qui balaient la partie orientale du pays. Ils se heurtent au versant oriental de la crête et subissent ainsi une déviation par les montagnes qui les poussent en hauteur. Au dessus de la crête, ils se refroidissent et par après, descendent dans le graben.

Le voisinage du lac et les contreforts font apparaître dans la plaine, une série de vents locaux dont les plus réguliers et les plus importants sont d'une part, la brise du lac qui souffle le jour du Sud vers la Nord et se manifeste surtout pendant la saison sèche, et d'autre part, le brise de terre qui souffle la nuit vers le lac.

Les abords immédiats des piedmonts sont en plus soumis à des brises de montagne qui descendent des dorsales pendant la nuit et à des brises de vallée qui soufflent vers la montagne pendant le jour.

II.5. Géologie du Burundi

L'Afrique est géologiquement constituée de noyaux cratoniques archéens bordés par des ceintures mobiles d'âge protérozoique. Ces cratons sont séparés par des chaînes mobiles qui sont elles-mêmes successivement cratonisées au cours du précambrien, de sorte que seules les pointes Nord et Sud du continent ont réagi face aux orogenèses paléozoïques et plus récentes.

II.5.1. Contexte régional

En Afrique centrale et orientale, quatre noyaux cratoniques sont connus (fig.II.6) :

- le craton du Congo (ou du Kasaï);
- le craton de Tanzanie;
- le Bangweulu bloc et ;
- le craton de Zimbabwe .

Les ceintures mobiles qui les séparent sont relativement étroites (200-300 km) mais allongées sur plusieurs centaines de km. Celles qui concernent le Burundi sont la chaîne Kibarienne (1400-1000 Ma) et la chaîne panafricaine (800-600 Ma).

La chaîne kibarienne, qui emprunte son nom aux monts Kibara du Congo, couvre plus de 250000 km² et s'étend de part et d'autre du lac Tanganyika. La partie occidentale de la chaîne s'étend au Congo dans les provinces du Shaba et du Kivu, elle est délimitée à l'Ouest et au Nord par le craton du Congo. La

partie orientale couvre le Burundi, le Rwanda , le Nord-Ouest de la Tanzanie et le Sud-Ouest de l'Ouganda. Les deux parties du Kibarien sont séparées par un complexe paléoprotérozoïque dénommé Rusizien. (fig.II.7) .

La chaîne Kibarienne prend différentes dénominations suivant les endroits : ainsi, au Burundi et au Rwanda, il s'agit du Burundien , alors qu'en Tanzanie et en Ouganda, on parle de "Karangwe-ankolean".

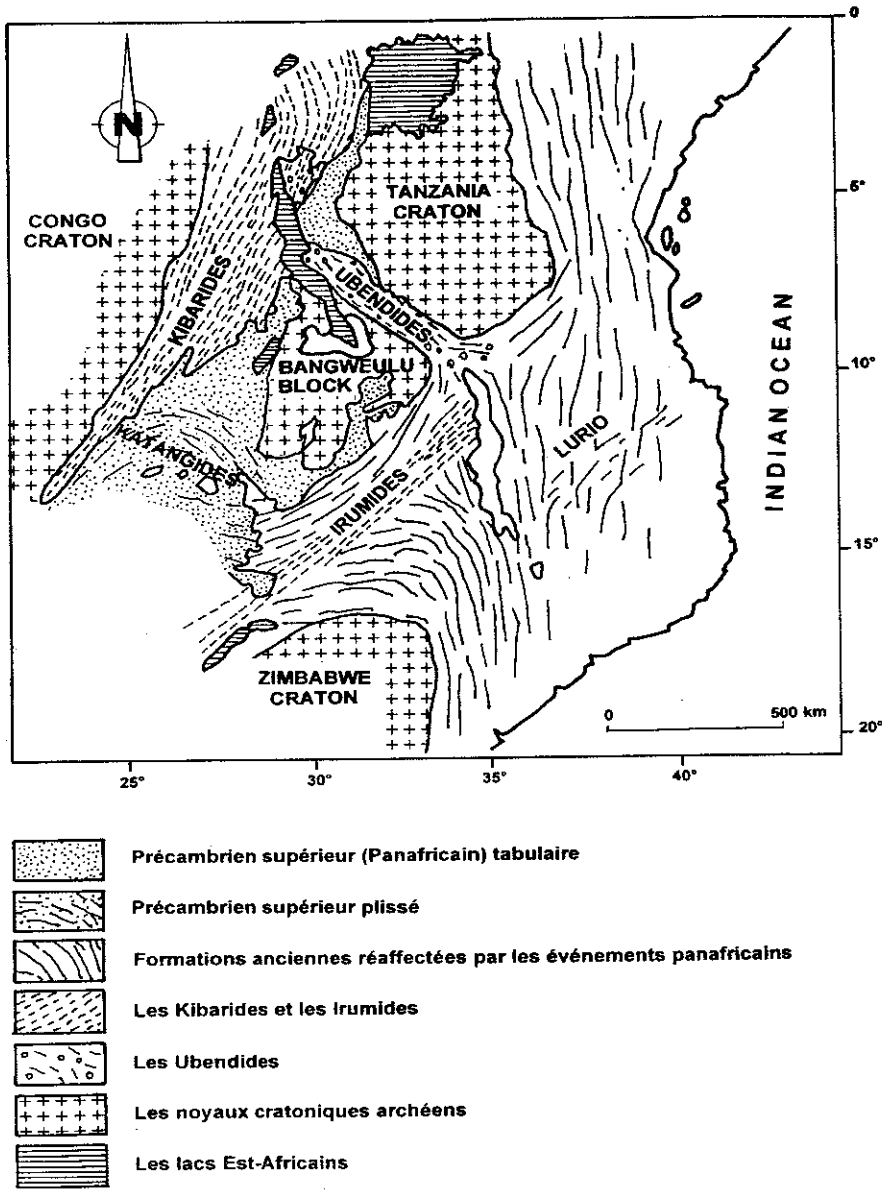


Figure II.6 : RELATIONS ENTRE LES CRATONS ET LES CEINTURES MOBILES EN AFRIQUE CENTRALE, D'APRES KLERKX (1985 a et b)



Fig. II.7 : Extent of Mesoproterozoic units in eastern and central Africa.1. Northern segment of Kibara belt, 2. Southern segment of Kibara belt, 3. Mporokoso basin, 4. Irumide belt, after Schlüter (1997).

II.5.1.1 Fossé du lac Tanganyika

Le fossé du lac Tanganyika est localisé le long de la branche occidentale du rift Est-africain et fait partie du grand linéament Tanganyika-Rukwa-Malawi dit « TRM » (fig.II.8). Il s'est développé sur un socle ancien structuré par les orogènes successifs du Précambrien.

La partie méridionale du fossé du lac s'inscrit dans un couloir structuré par les orogènes de l'Ubendien et du Rusizien (1800-2100 Ma) entre les cratons zambien et tanzanien (fig.II.9). Les directions structurales NW-SE de ces chaînes sont réactivées dans les mouvements néotectoniques du linéament TRM.

La partie septentrionale du fossé s'ouvre à l'intersection des chaînes kibarienne (directions structurales NE-SW) et ruzizienne (Klerkx, 1988 ; Klerkx & Nanyaro, 1988 ; cités par Reynes et al. ; 1993). Dans cette zone, des accidents N-S s'y développent. La combinaison des trois directions NW-SE, NE-SW et N-S influence l'ouverture subméridienne du fossé à cet endroit (Reynes et al. ; 1993).

Selon Le Fournier (1985), l'évolution tectonique du bassin du lac Tanganyika a connu trois stades successifs:

- un stade initial d'étirement au cours duquel le mouvement a été contrôlé par le jeu d'un réseau serré d'accidents décrochants à faible rejet vertical. Il semble qu'il ait induit la formation de vastes zones dépressionnaires, faiblement subsidentes;

- un stade d'étirement avec basculement de blocs au cours duquel le mouvement s'est concentré un niveau d'un nombre limité de failles normales présentant probablement une courbure en profondeur, qui a induit une dynamique de basculement de blocs. Il en est résulté une fragmentation des zones dépressionnaires en une mosaïque de bassins asymétriques orientés soit NNE-SSO, soit NO-SE , ces deux directions étant commandées par la fracturation ancienne du socle (fig.II.10). Dans la partie septentrionale orientée Nord-Sud, ces bassins sont principalement orientés NNE-SSO. Ce sont les bassins de Bujumbura, Fizi, Rumonge, Nyanza-lac et de Kigoma. Dans la partie méridionale, la direction prédominante est NO-SE ; ce sont les bassins de Kabimba, Kalemie, Moba et Mpulungu ;

- un stade d'étirement avec effondrement : c'est à ce stade que la zone subsidente a progressivement acquis sa morphologie actuelle de fossé d'effondrement limité par des épaulements engendrant un important relief.

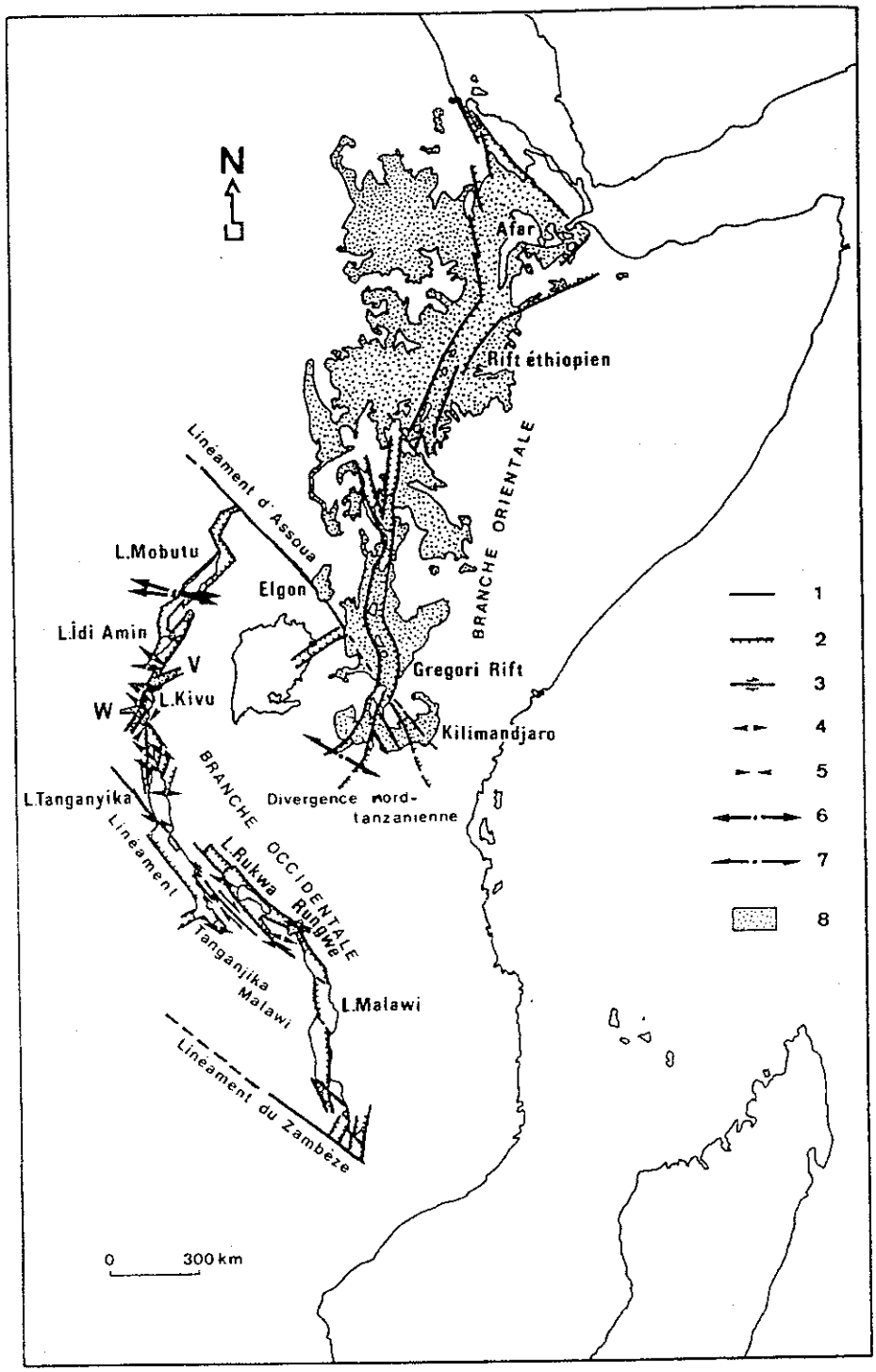


Fig.II.8 :

:Schéma structural du rift est-africain, faisant intervenir des zones transformantes NW-SE, rejeux partiels de linéaments précambriens

1 : faille; 2 : faille normale; 3 : décrochement; 4 : direction d'extension; 5 : direction de compression; 6 et 7 : d'après les mécanismes au foyer, extension (6), décrochement (7); 8 : volcanisme cénozoïque; V : fossé et chaîne volcanique des Virunga; W : fossé de Walungu

D'après J.Chorowicz (1983).

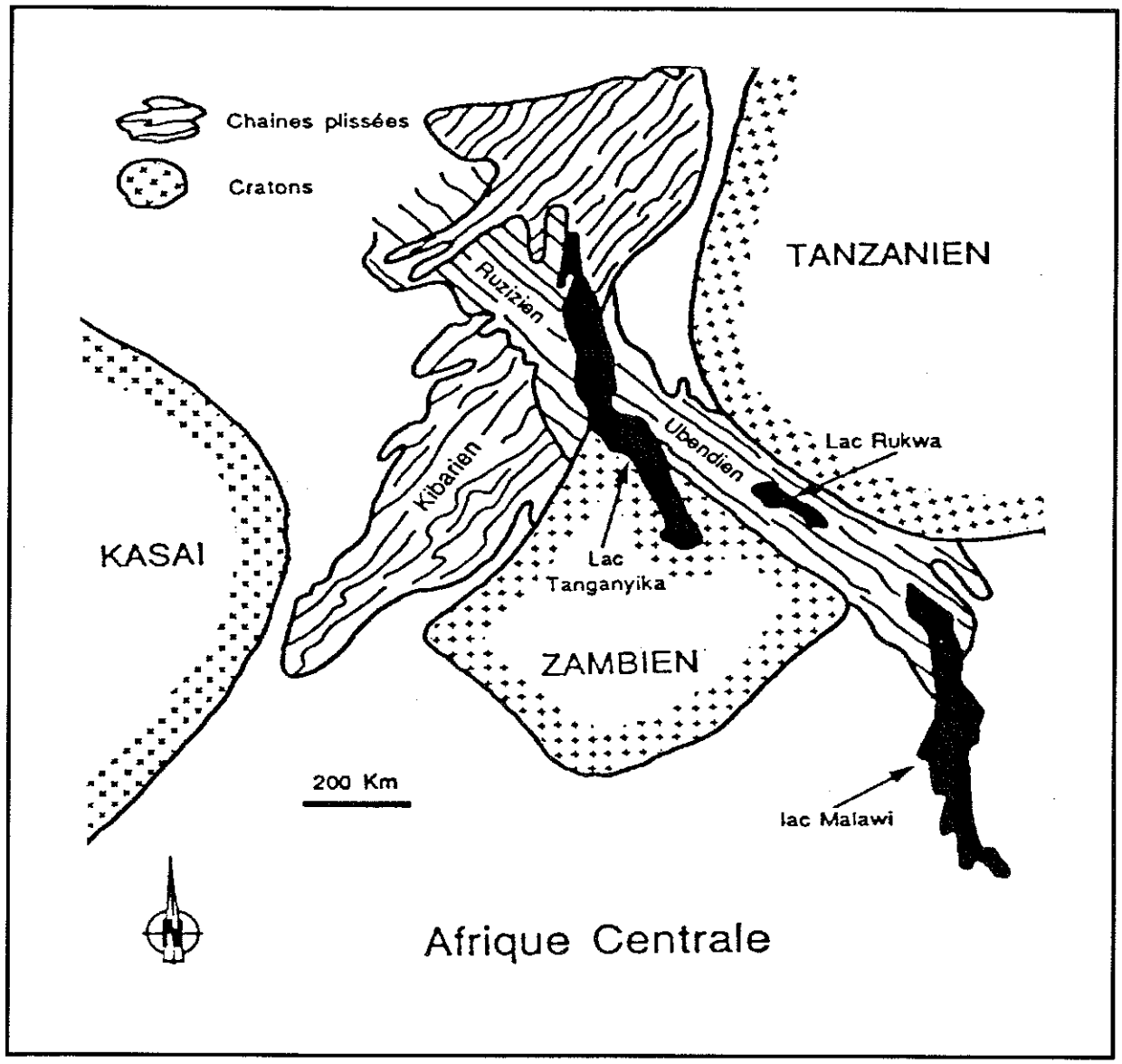
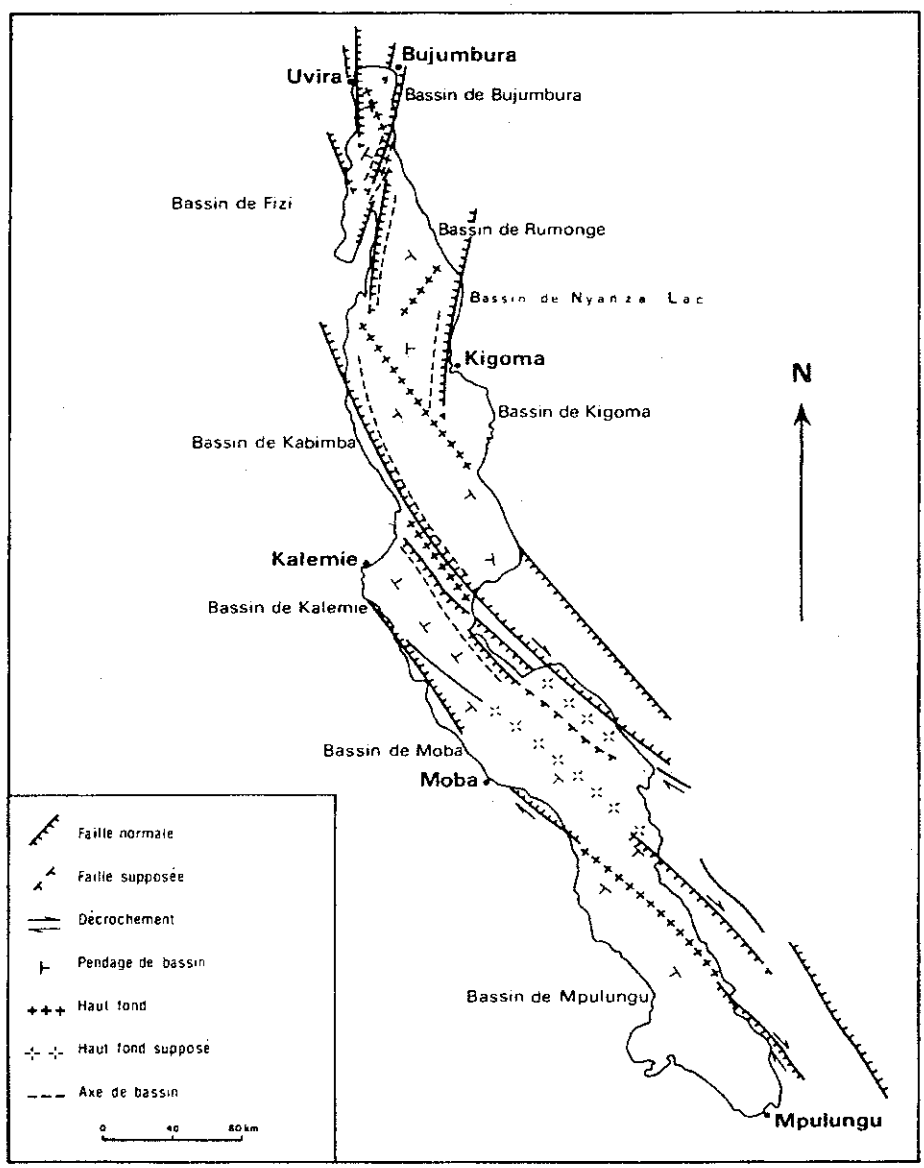


Fig.II.9 : Héritage des structures anciennes par le fossé du Tanganyika (d'après McConnel, 1972 ; Klerkx, 1988 ; Kroner, 1975 ; Geological map of UNESCO, 1972-75 ; cités par Reynes et al.(1993)

Fig.II.10 : Les grands traits structuraux du lac Tanganyika (Le Fournier, 1985)



Trois phases différentes d'évolution sédimentaire sont la conséquence de trois stades successifs d'étirement crustal Le Fournier et al (1985):

- au cours de la 1ère phase, la sédimentation peu épaisse, a un caractère fluviatile, puis les dépôts passent verticalement et latéralement à des sédiments de marécages avec l'accentuation de la subsidence ;

- au cours de la 2ème phase, le paysage se transforme en assemblage de petits lacs correspondant à la mosaïque des bassins limités par des blocs basculés ; la sédimentation de marais passe à une sédimentation lacustre franche, alimentée en matériel détritique très immature par l'érosion des blocs basculés et les bordures du rift;

- la 3ème phase comprend deux épisodes de sédimentation : au cours du 1er épisode, à cause de l'accélération de la subsidence, la bassin s'approfondit rapidement et la sédimentation détritique est déficitaire ; la sédimentation est dominée par des apports organiques autochtones. Au cours du second épisode, on observe un rattrapage sédimentaire qui est essentiellement le fait de la mise en place de dépôts deltaïques.

Dans le cadre du programme PROBE (Proto-Rifts and Ocean Basin Evolution ; 1985-1986), une équipe de la Duke University (USA) a réalisé de nombreuses lignes sismiques multitraces dans les lacs Tanganyika, Malawi (Nyasa) et Turkana (anciennement Rodolphe). Pendant la même période, le programme GEORIFT (Géologie du Rift Est-Africain) a exploré les couches superficielles du fossé par la sismique échosondeur 3.5 kHz. Les données recueillies lors de ces deux programmes ont permis la reconnaissance de plusieurs discontinuités sismiques et sédimentaires au sein de la série de remplissage du lac Tanganyika (Tiercelin et al., 1989).

L'équipe du programme PROBE a observé le caractère asymétrique des unités tectoniques formant les fossés du rift est-africain en général et a postulé que l'unité de base de ces fossés est le demi-graben (fig.II.11). La subsidence maximale dans la plupart des demi-grabens se fait le long des failles bordières maîtresses à une époque donnée et les plus hauts sommets sont localisés généralement à proximité des zones à forte subsidence (Bandora, 1996). La fig.II.12 reprend un schéma probable d'une association de demi-grabens dans un système de rift et la fig.II.13 montre la structure générale du rift Tanganyika.

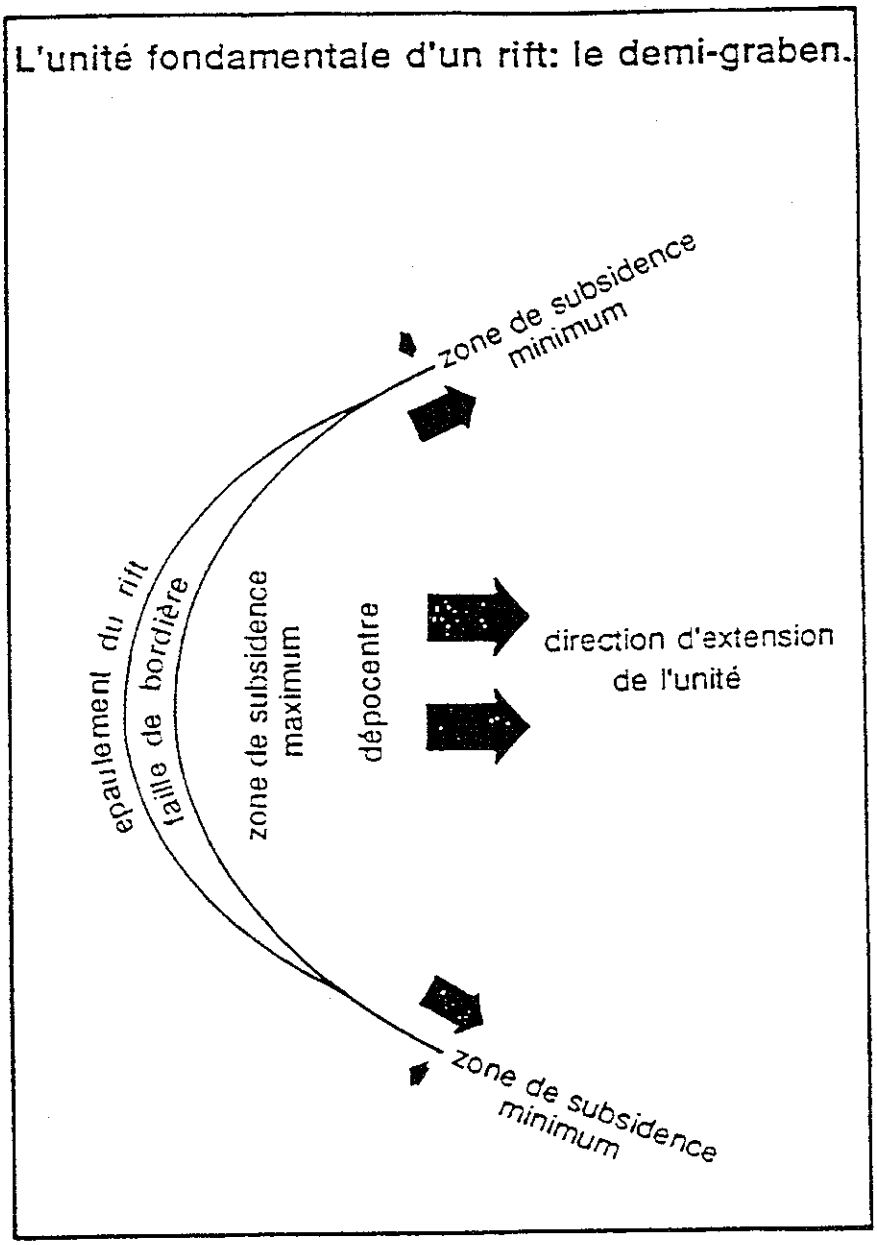


Fig.II.11 : Schéma idéalisé d'un demi graben (Rosendhal et al.,1988, cité par Bandora, 1996)

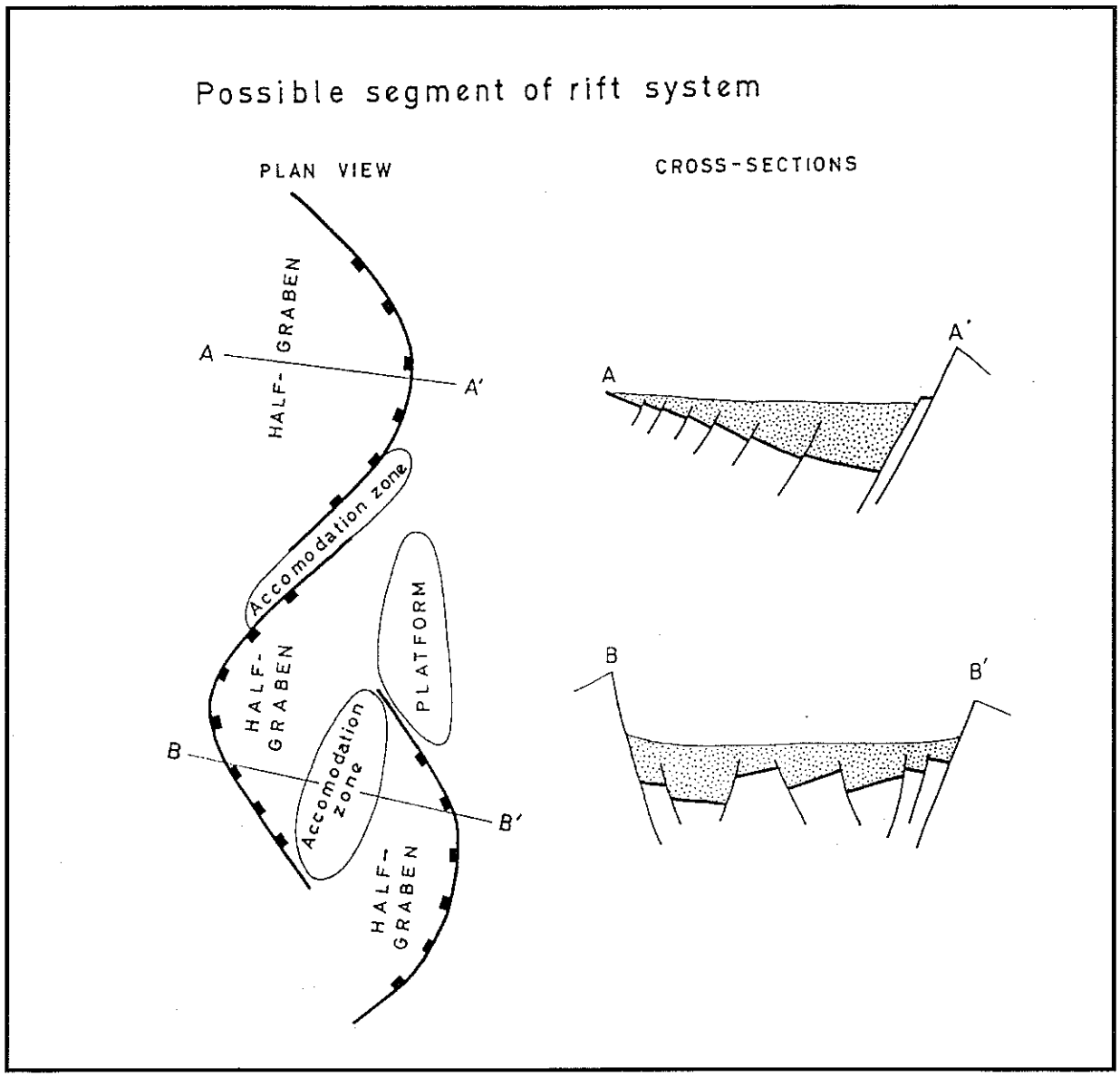


Fig.II.12: Possible segment of a rift system, formed by longitudinal association of half-graben units with development of accommodation zones and platforms (after Sander & Rosendhal,1989 and Specht & Rosendhal,1989, in Delvaux,1991).

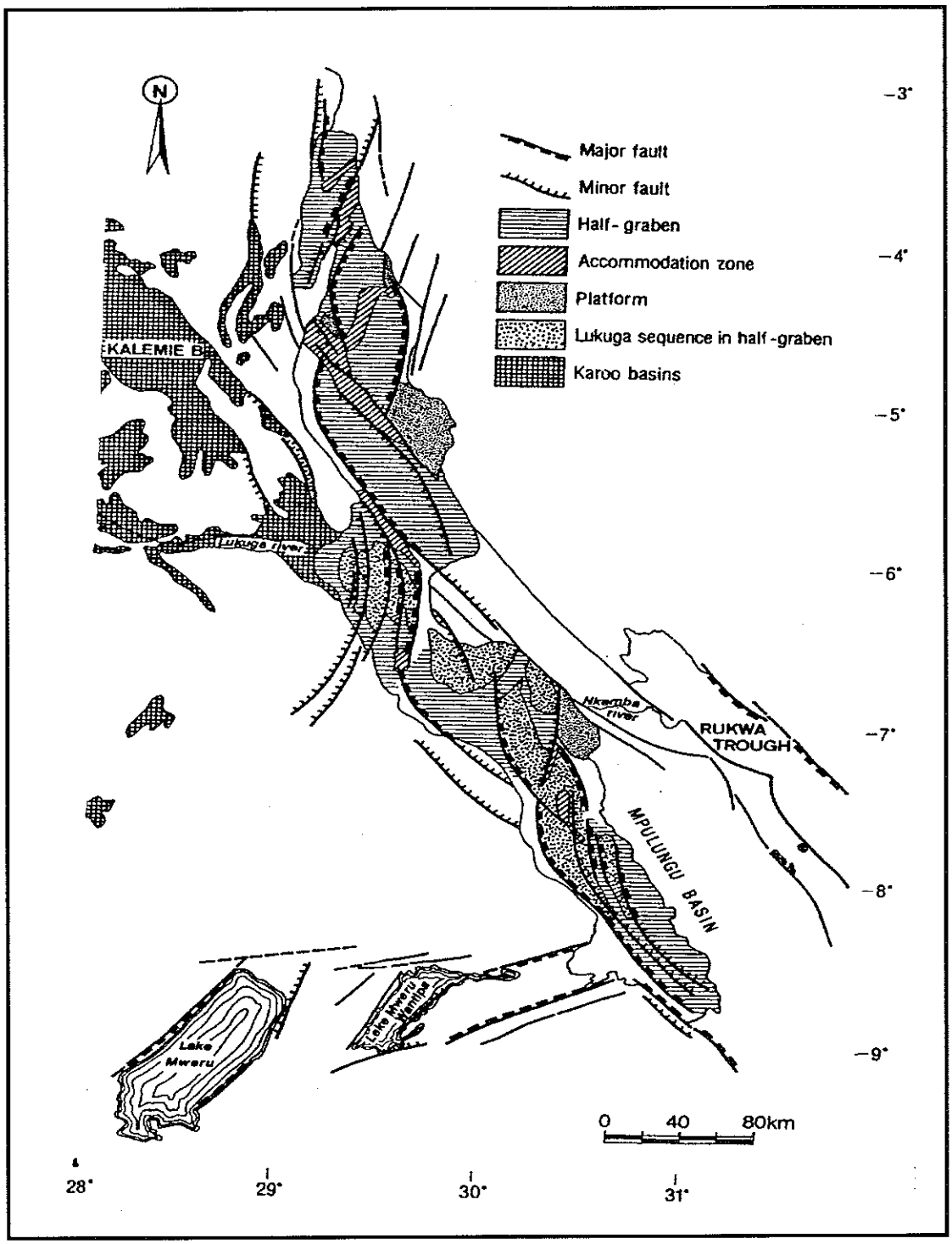


Fig.II.13 : Structure générale du Rift de Tanganyika, basée sur Sander & Rosendhal (1989) compilé par Delvaux (1991) ; dans Delvaux (2001).

Les différentes phases tectoniques ont généré de nombreux bassins sédimentaires et lacs dans le Rift Est-Africain. Le fossé du Tanganyika comprend schématiquement un bassin septentrional orienté N0°, profond de 1310 m, et un bassin méridional orienté N140°, profond de 1470 m, limités par des failles et partiellement isolés par le seuil tectonique de Kalemie, orienté

N135° et de profondeur moyenne de 500 m. Ces deux bassins sont divisés structuralement et morphologiquement en sous- bassins orientés N 40° ou N135° et isolés par des seuils mineurs (fig.II.14).

Les seuils correspondent aux horsts et hauts-fonds et servent de liaison dynamique entre deux bassins adjacents dans l'ensemble. De telles structures conditionnent la topographie sous-lacustre et jouent le rôle de barrière naturelle qui réduit les transits sédimentaires d'un bassin à l'autre (Rosendahl et al., 1988 ; Gawthorpe & Colella, 1990, cités par Bandora,1996). L'épaisseur de la série de remplissage du fossé atteint 6000 m (Tiercelin et al.,1989).

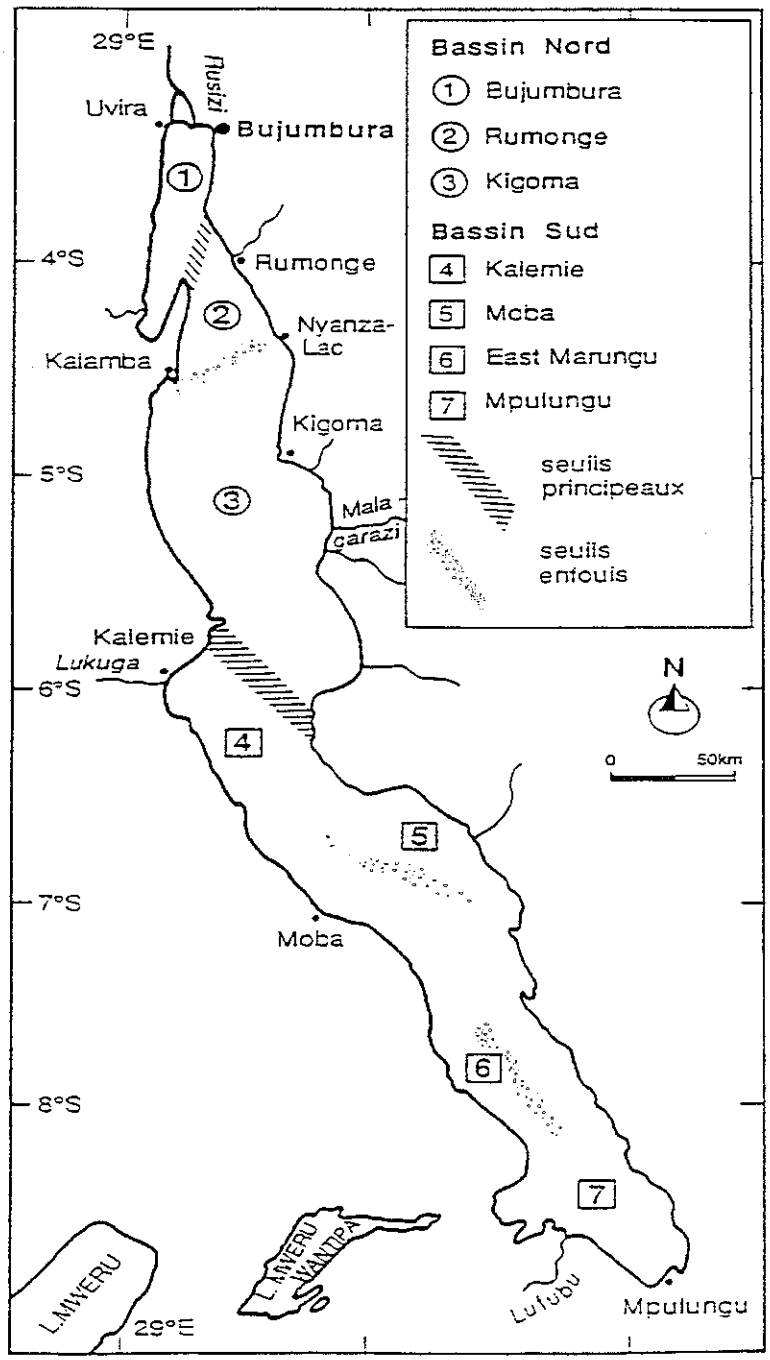


Fig.II.14 : Les principales composantes du bassin du lac Tanganyika (modifiée d'après Rolet et al., 1991, dans Bandora, 1996).

Le long du linéament Tanganyika-Rukwa-Malawi, le volcanisme est localisé aux centres volcaniques du Virunga, du Sud Kivu et du Rungwe.(fig.II.15). Ces centres coïncident aux zones de transfert (d'accommodation) et suggère une relation étroite entre le volcanisme et l'effondrement au début du développement du rift continental (Delvaux,1991).

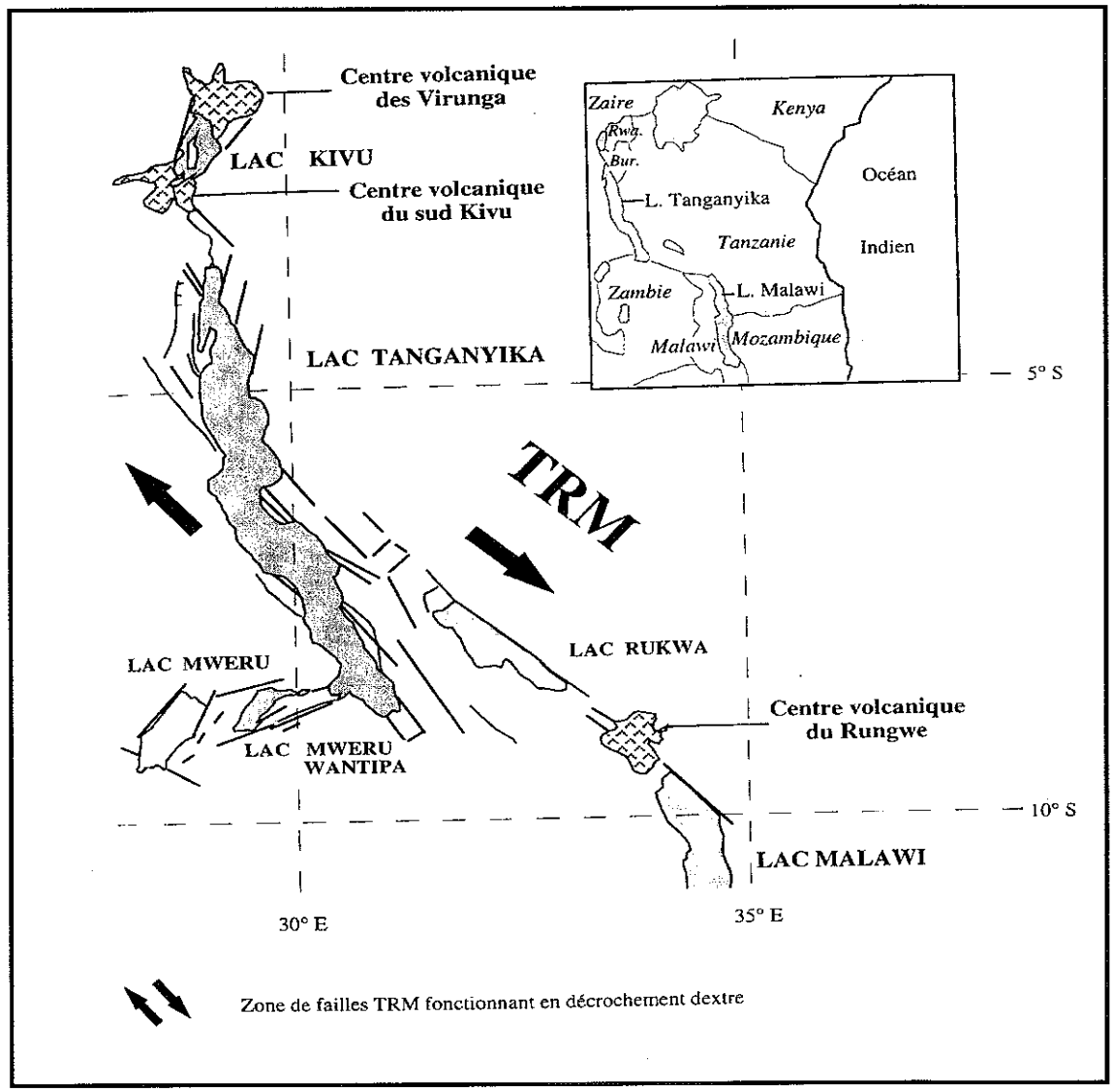


Fig.II .15: Schéma structural présentant les lacs et les provinces volcaniques de la branche occidentale du Rift Est-Africain, linéament Tanganyika–Rukwa-Malawi, Branchu (2001) .

L'activité hydrothermale est représentée par de sources chaudes terrestres ou lacustres dans la graben ou à son voisinage. Ces sources sont principalement situées le long de failles actives.

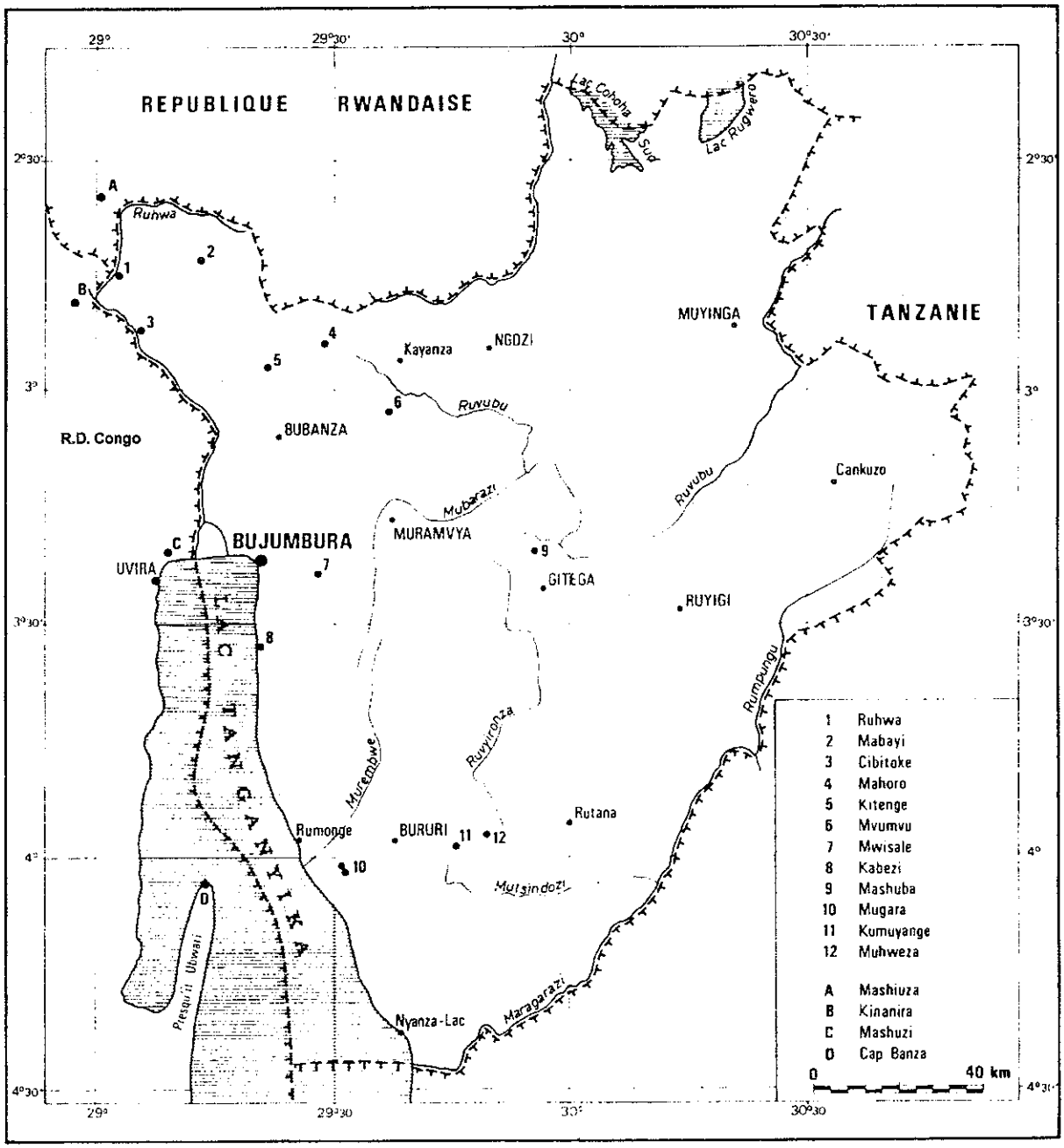


Fig.II.16 : Sources thermales du Burundi et des régions avoisinantes (Deelstra et al. 1972).

Deelstra et al (1972) ont étudié les eaux thermales du Burundi et des régions avoisinantes (fig.II.16). Les sources de Ruhwa (1), Kinanira (B) et Cibitoke (3) sont situées dans la plaine de la Rusizi. Elles sont caractérisées par des

dépôts de travertin accompagnant les sources en activité et probablement d'anciennes sources taries.

L'exploration de l'activité hydrothermale existant sur la rive congolaise du fossé Nord-Tanganyika a été réalisée par une équipe de scientifique multinationale (Groupe TANGANYDRO : France, Allemagne, R.D Congo, Burundi). Les sites hydrothermaux étudiés sont situés à l'intersection des directions subméridiennes et des répliques N140° d'accidents majeurs du type zone de failles TRM (fig.II.17).

Les résultats obtenus suggèrent une relation entre leur localisation, les phénomènes de néotectonique et certaines anomalies de flux thermique. Sur les sites de Pemba et du Cap Banza, les émissions de fluides et certaines minéralisations sulfurées sont contrôlées par des rejeux en ouverture de la foliation et des fractures précambriennes. En effet, ces champs hydrothermaux sont situés à l'intersection des directions subméridiennes et des répliques N140° d'accidents majeurs du type zone de failles TRM. Les circulations de fluides seraient ainsi facilitées par l'ouverture en fentes de tension de la schistosité précambrienne sous influence des ces accidents dextres (Tanganydro, 1991).

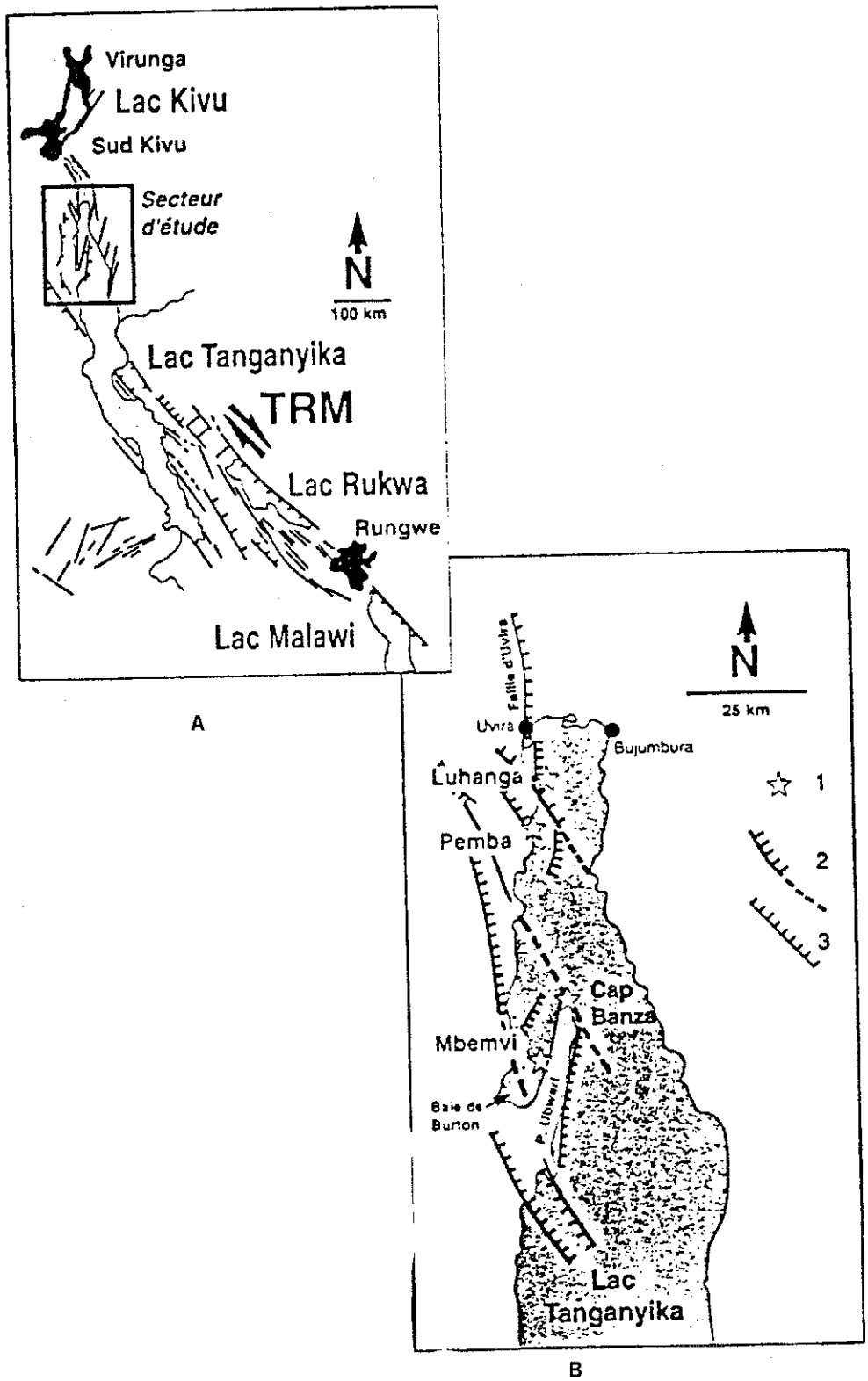


Fig.II.17. A : Schéma structural simplifié du fossé du Tanganyika montrant les zones de failles et les centres volcaniques

Fig. II.17.B : Contexte structural des sites hydrothermaux du bassin Nord -Tanganyika. 1 : Sites hydrothermaux ; 2 : Cisaillement ; 3 : Failles normales (Tanganydro, 1992).

II.5.2. Contexte local

La géologie du Burundi, comme celle du Rwanda, a été étudiée depuis 1919, année au cours de laquelle les deux pays furent placés sous tutelle de la Belgique par la Société des Nations .

Les premiers travaux dans ce domaine furent ceux des chercheurs belges, F.Delhaye et A. Salée en 1921, qui ont abouti à la publication d'une carte géologique des deux pays au 1/200.000 en 1928. Ils ont subdivisé le pays en trois « systèmes » suivant le degré de métamorphisme, à savoir (du plus ancien au plus jeune) :

- le système de la Ruzizi (très métamorphique) ;
- le système de l'Urundi (faiblement métamorphique) ;
- le système de la Lumpungu (non métamorphique).

En 1951, la commission des géologues belges, après discussion, a remplacé le terme « système » par celui de « groupe » à caractère lithostratigraphique, et a préféré désigner le groupe le plus récent par le nom « Malagarazi », qui est le nom de la rivière du Sud-Est dans la dépression du Moso .

En 1967, Cahen et Lepersonne conservent les trois groupes mais en les désignant respectivement, en commençant par le plus ancien, par Ruzizien , Burundien et Malagarazien. Le Burundien est corrélé avec le Kibarien du Congo et avec le Karangwe-Ankolean de la Tanzanie et de l'Ouganda, tandis que le Rusizien trouve son équivalent dans l'Ubendien.

En 1977, le département de géologie du Musée Royal de l'Afrique centrale sous la direction de J.Klerkx, démarre le projet de cartographie géologique du pays au 1/100.000. Un ensemble géologique caractérisé par des roches archéennes a été mis en évidence (Klerkx & Theunissen, 1977 ; Demaiffe & Theunissen, 1979 ; Ledent, 1979 ; Theunissen & Klerkx, 1980, Nzojibwami, 1983). Cet ensemble fut identifié dans les régions de Nyanza-Lac, Mugera et Mugere et est toujours surmonté du Burundien.

Theunissen & Klerkx (1980) commencent à douter de l'existence d'une véritable unité Ruzizienne. Liégeois et al. (1982) franchit le pas et fait correspondre le Rusizien d'une part à un socle archéen et, d'autre part, à des roches magmatiques et métamorphiques du Burundien, affectées davantage par un métamorphisme et une granitisation. A la place du Rusizien, on parle de Burundien anté-burundien. Ntungicimpaye (1984) dresse une carte schématique montrant les grandes unités géologiques du Burundi (fig.II.18).

Le précambrien du Burundi est subdivisé du plus jeune au plus ancien en :
- protérozoïque supérieur (800-1000m.a) : le Malagarazien;
- protérozoïque moyen (1000-1600 m.a) : le Burundien;

- socle archéen (2500-3500 m.a).

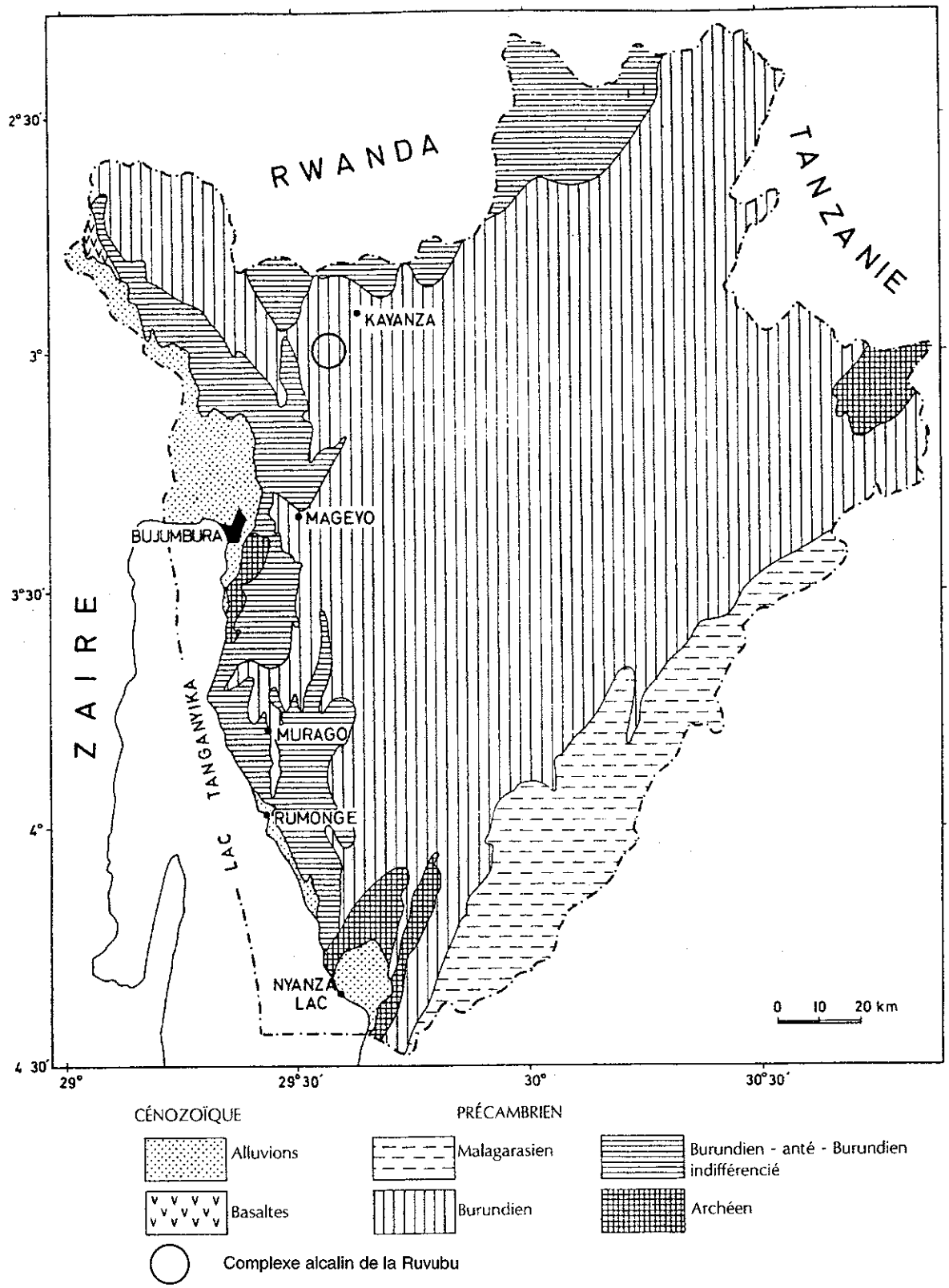


Fig.II.18 : Grandes unités géologiques du Burundi (d'après Ntungicimpaye, 1984, modifié)

II.5.2.1. Malagarazien

Le Malagarazien est l'unité précambrienne la plus récente du Burundi. Il constitue, avec le complexe alcalin de la haute Ruvubu, le protérozoïque supérieur. Il affleure au Sud-Est du pays où il repose en discordance angulaire sur le Burundien (Waleffe, 1965). Il est formé d'une série sédimentaire non métamorphique d'épaisseur variant entre 3000 et 4000 m. Ce sont des conglomérats à la base suivis de quartzites, quartzo-phyllades et de phyllades, grès, schistes, basaltes, schistes calcareux, dolomies, laves amygdaloïdes et roches détritiques. Les formations du Malagarazien sont subhorizontales. Elles sont intrudées par une série de dolérites qui ont permis à Cahen et Snelling (1974) de dater le Malagarasien. Celui-ci a un âge compris entre 800 et 1000 M.a .

Le Malagarazien n'est représenté que par une petite bande longeant la frontière orientale et qui constitue la terminaison des "Bukoban serie" de Tanzanie (fig.II.19).

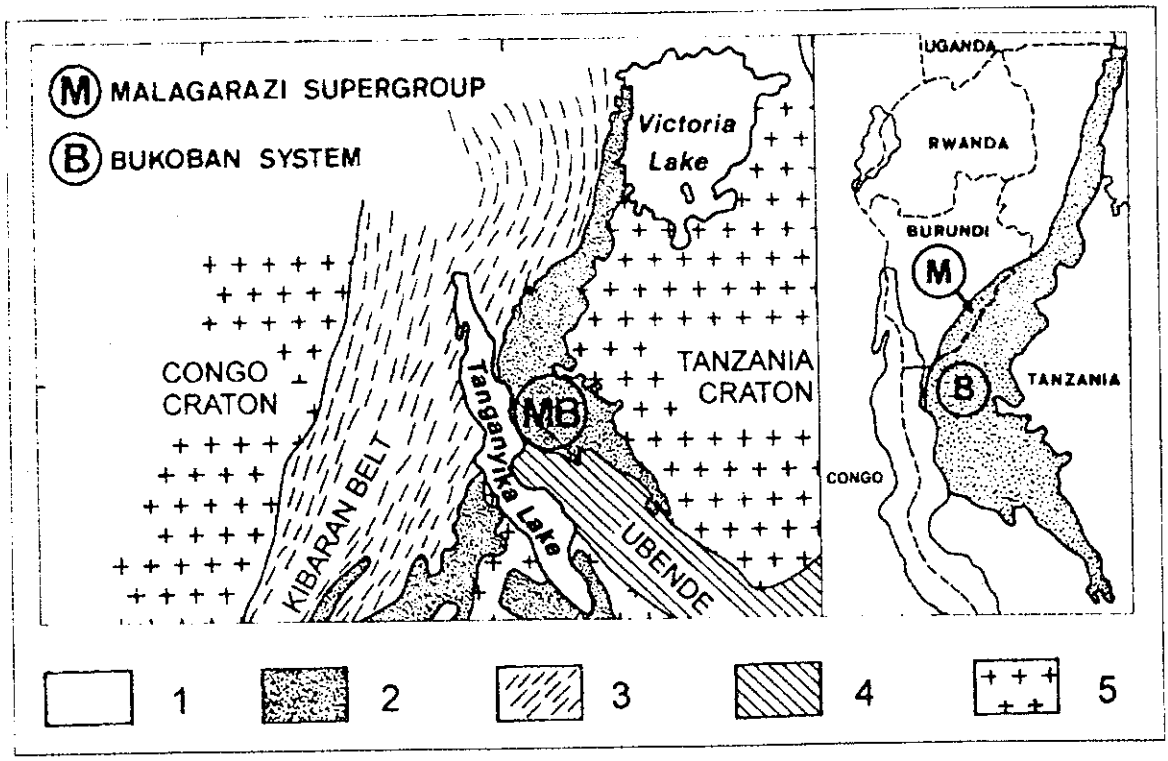


Fig.II.19 : Geological sketch map of Eastern Africa (after Cahen et al., 1984). 1: Lake and recent sediments; 2: tabular Neoproterozoic with Malagarazi (M) and Bukaoba (B) Supergroups (not taking into account the new Ar-Ar data); 3: Meseoproterozoic Kibarian Belt; 4: palaeproterozoic Ubendian Belt; 5: cratonised area (> 2500 Ma). Political borders are shown in the right frame. Deblond (2001).

II.5.2.2. Burundien

Le protérozoïque moyen, localement appelé Burundien, repose directement sur le socle archéen. Il recouvre la majeure partie du pays. Il est limité à l'Est par des sédiments subhorizontaux peu ou pas métamorphiques appartenant au protérozoïque supérieur.

L'entité burundienne se subdivise en deux domaines: l'Est et l'Ouest qui sont séparés par une discontinuité que l'on appelle l'accident du 30ème méridien.

Le compartiment oriental est constitué par des sédiments essentiellement arénacés qui ont été très peu affectés par le métamorphisme. Dans cette partie, Waleffe (1966) a précisé la stratigraphie du Burundien qui comprend:

- le Burundien inférieur avec une épaisseur de 1150 m de sédiments constitués de schistes et de quelques quartzites :

- le Burundien moyen avec une épaisseur de sédiments de 2500 m constitués de schistes gréseux et beaucoup de quartzites ;

- le Burundien supérieur avec 1300 m de sédiments toujours arénacés et devenant microconglomératiques.

Dans la partie occidentale du pays, les sédiments du Burundien deviennent plus pélitiques et accusent un métamorphisme plus prononcé, atteignant localement le faciès amphibolitique.

D'après les conclusions du workshop sur la chaîne kibarienne tenue en 1983 à Bujumbura, le Burundien inférieur n'est pas représenté à l'Ouest, sauf dans la partie Sud du pays. Le Burundien moyen montre à la base un quartzite ; celui-ci est surmonté d'une série de phyllites avec quelques intercalations d'amphibolo-schistes et de roches basiques amygdalaires. Dans la partie supérieure, la série devient arénacée, grauwackoïde et microconglomératique (De Mulder et Theunissen, 1980).

II.5.2.3. Archéen

Deux ensembles archéens sont connus dans le pays :

- le complexe archéen de Nyanza-lac au Sud-Ouest du Burundi (Demaiffe et Theunissen, 1979), qui a donné un âge U/Pb de 2600 M.a ;

- le complexe archéen de Mugera au Nord-Est du pays (Ledent, 1979) a donné un âge U/Pb de 2611 M.a . Il est surmonté de séquences appartenant à la base du Burundien inférieur. Cette partie du socle est située en bordure de

la chaîne kibarienne et on peut considérer qu'elle fait partie intégrante du craton tanzanien (Lavreau et al. (1991).

Le complexe migmatique anté-burundien de Bujumbura (Nzojibwami, 1983) n'a pas encore été daté.

Ces trois ensembles sont composés de roches ayant subi une évolution tectono-métamorphique anté-kibarienne complexe (Theunissen et Klerkx, 1977, Nzojibwami, 1983, 1984, 1985). Il s'agit essentiellement de migmatites et de gneiss granitiques qui contiennent localement des intercalations d'amphiboles et de métaquartzites.

II.5.2.4. Cénozoïque

Le Cénozoïque est représenté par les formations sédimentaires et les coulées de laves basaltiques cénozoïques à récentes du graben du lac Tanganyika : la plaine de la Rusizi , le bord oriental du lac Tanganyika à Kabezi, Rumonge et Nyanza-lac.

Dans la plaine du Moso (vallée de la Malagarazi et de la Rumpungwe), on y observe également des dépôts sablo-graveleux mais d'épaisseur réduite. D'autres formations de même type existent dans de petites plaines alluviales, notamment celles des rivières Ruvyironza et Ruvubu.

II.5.3. Révision du modèle d'évolution du segment NE de la chaîne Kibarienne

Des données récentes ont conduit à une révision du modèle d'évolution du segment NE de la chaîne kibarienne (Tack et al.,1994, cité par Deblond, 1994). Les nouvelles conceptions se basent sur l'étude comparative des formations géologiques de l'Ouest de la Tanzanie, du Burundi, du Rwanda et du Sud de l'Ouganda, et sur de nouvelles données géochimiques, géochronologiques et isotopiques relatives aux granites alcalins et à la ceinture basique-ultrabasique de Kabanga-Musongati (fig.II.20). La ceinture est ainsi dénommée en référence aux deux principaux gîtes nickelifères associés à cette structure : le massif de Kabanga en Tanzanie et la massif de Musongati au Burundi.

Selon Tack et al.(1994), la partie septentrionale de la chaîne kibarienne se subdivise en deux domaines distincts du point de vue lithostratigraphique, magmatique, métamorphique et structural. Il s'agit du domaine interne occidental et du domaine externe oriental, séparés par une zone frontière principalement jalonnée de massifs basiques et ultrabasiques (ceinture Kabanga-Musongati) et de granitoïdes alcalins (alignement Gitega-Makebuko-Bukirasazi).

Le domaine interne occidental (hachures horizontales, fig.II.20) est limité à l'Ouest par la branche occidentale du Grand Rift et au Nord par les formations paléoprotérozoïques du Buganda-Toro. Il est constitué de sédiments détritiques terrigènes correspondant aux Groupes moyen et supérieur du Supergoupe du Burundi. Ces formations sont intrudées par d'abondants granites peralumineux à deux micas.

Les terrains du domaine interne occidental sont affectés de plis droits cylindriques image d'un système en compression (Klerkx et al., 1987). La mise en place de certaines de ces granites peralumineux est mise en relation avec cette phase compressive. Le domaine est caractérisé par un métamorphisme régional ne dépassant pas le faciès des amphibolites et est affecté de chevauchement et de cisaillement.

Le domaine externe oriental (hachures obliques) est limité au Nord par les formations paléoprotérozoïques du Buganda-Toro. Il est limité par le lac Victoria, une part du craton tanzanien et par des sédiments du Néoprotérozoïque (hachures croisées). Ce domaine est constitué de sédiments détritiques terrigènes indiquant un milieu de dépôt peu profond. Ils correspondent au groupe inférieur du Supergroupe du Burundi.

Le domaine externe oriental est caractérisé par l'absence d'intrusions granitiques et par l'effacement progressif, vers l'Est, de l'intensité des déformations et du métamorphisme régional, ce dernier ne dépassant pas le faciès des schistes verts à la bordure occidentale.

La zone frontière (non hachurée), comprise entre les deux domaines, orientée plus ou moins NE-SW, est jalonnée par la ceinture des massifs basiques – ultrabasiques de Kabanga-Musongati. Les granitoïdes alcalins de Gitega-Makebuko-Bukirasazi apparaissent également dans cette zone. La nature des formations sédimentaires évoque celle du domaine externe oriental, le style tectonique celui du domaine interne occidental (Deblond, 1994).

Sur la carte géologique (au 1/250000, 1990) établi par le Musée Royal de l'Afrique Centrale les formations de Kavumwe et Nkoma (NE du Burundi, fig.II.21) sont placées au Néoprotérozoïque. La corrélation lithostrastrigraphique régionale récente (Tack, 1995, 2002) et les données géochronologiques (Deblond, 2001) ont montré que ces formations, de même que celle de Bukoba Sandstone (Tanzanie) recouvrant le craton Tanzanien, appartiennent au Méprotérozoïque. Cette réinterprétation réduit l'extension des Supergroupes néoprotérozoïques de la Malagarazi (Burundi) et de Bukoba (Tanzanie) (fig.II.22).

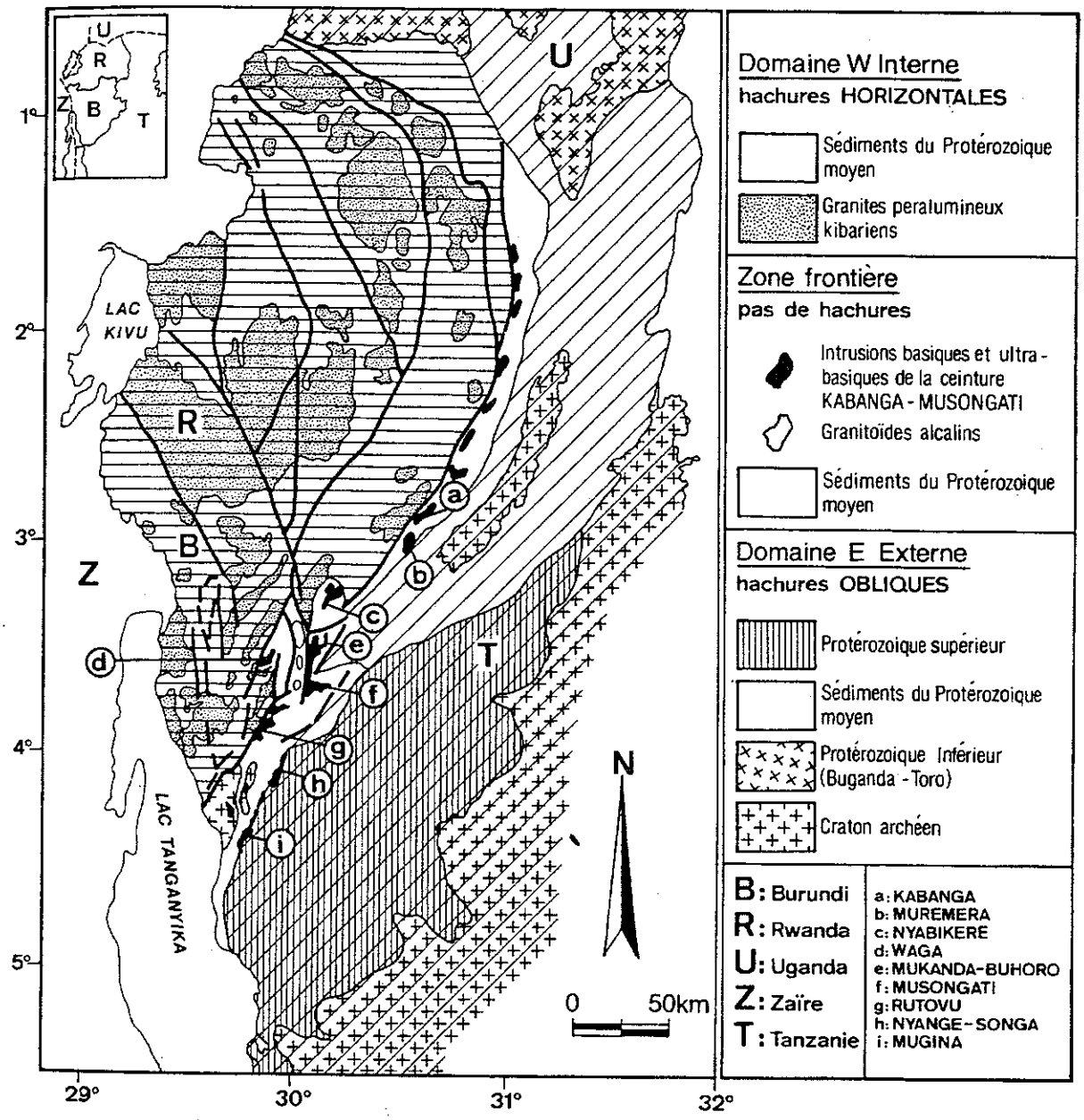


Fig.II.20 : Carte géologique du segment NE de la chaîne kibarienne, et localisation des massifs basiques et ultrabasiques de la ceinture Kabanga-Musongati du Burundi (Tack et al. 1993 ; cité par Deblond 1994).

La lithostratigraphie révisée des domaines occidental et oriental indique que les successions lithostratigraphiques distinctes ont été déposées durant le Mésoprotérozoïque dans des bassins différents et sous différentes conditions. De plus, les bassins sédimentaires dans le deux domaines ont évolué différemment, probablement à cause des rhéologies différentes de leur soubassement pré-mésoprotérosoïque : le craton Archéen tanzanien dans le domaine externe et la chaîne mobile (Rusizien) dans le domaine interne occidental (Tack et al., 2002).

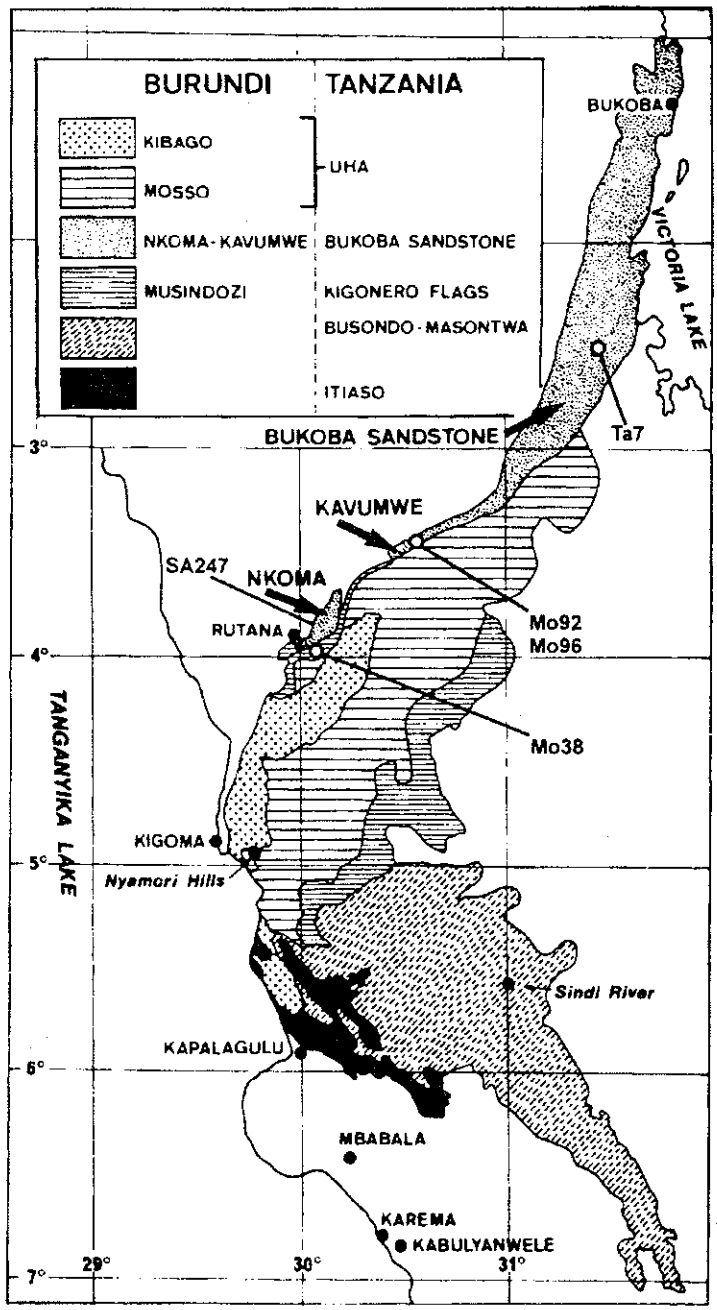


Fig. II.21: Simplified geological map and lithostratigraphy of the Meso- and Neoproterozoic sequences in southeast Burundi and northweast Tanzania (after Waleffe, 1965; Theunissen, 1988) indicating sampling localities; in Deblond (2001).

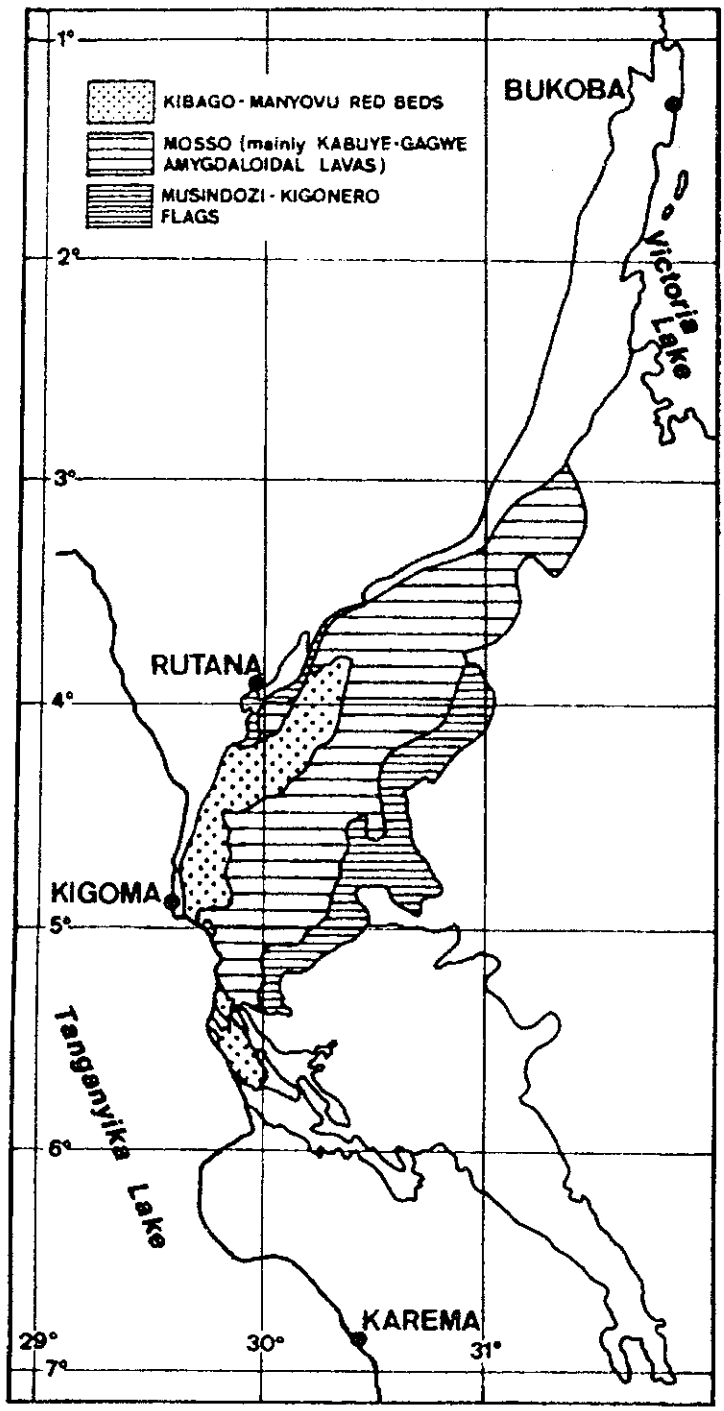


Fig.II.22: Simplified geological map and lithostratigraphy of Neoproterozoic deposits of southeast Burundi and northwest Tanzania (Tack, 1995; in Deblond, 2001).

II.5.4. Ages des roches magmatiques et des minéralisations au Burundi

Sur base de datations géochronologiques, quatre types majeurs d'intrusions granitiques kibariennes étaient connus. Ce sont :

- les granites Gr1 : ils sont homogènes, de texture porphyrique, bien souvent affectés d'une cataclase ou mylonitisation . La biotite prédomine par rapport à la muscovite. Ages U/Pb : 1325 Ma, et Rb/Sr : 1268±44 Ma (Klerkx et al. ; 1987, Ledent, 1979) ;

- les granites Gr2 : ce sont des granitoïdes souvent porphyriques, mais à textures très variables. L'abondance de la muscovite constitue une différence nette avec Gr1. Ages Rb/Sr : 1260±25 Ma (Liégeois et al., 1982) ;

- les granites Gr3 : ce sont des intrusions granitiques porphyriques, homogènes et à deux micas. Leurs caractéristiques géochimiques (Fernandez et al., 1986) sont distinctes de celles des granites précédents. Ils sont affectés d'une légère cataclase. Ages Rb/Sr : 1185 Ma ;

- les granites Gr4 : ce sont des intrusions de granites alcalins (Tack et al., 1984), de couleur rosâtre avec absence de muscovite, présence de feldspath alcalin, de biotite et d'une amphibole bleu verdâtre de tendance alcaline, localement cataclasé et mylonitisé.

Tout récemment, un programme de datation d'une sélection de granitoïdes par la méthode de microsonde ionique haute résolution (Sensitive Hight Resolution Microprobe, SHRIMP) vient d'être achevé (Tack, 2002). Les résultats non encore publiés, ensemble avec les données récentes de datation de minéraux variés de roches basiques intrusives par la méthode Ar-Ar (Deblond et al, 2001) et la détermination de l' âge des minéralisations au Burundi (Brinckmann et al., 2001, cité par Tack, 2002) couvrent le Méso – Néoprotérozoïque.

Deux épisodes magmatiques ont été mis en évidence pour la chaîne orogénique du Kibarien, (Tack, 2002) :

- autour de 1370 Ma, les corps de granitoïdes et de roches plutoniques basiques sont mis en place dans le domaine interne occidental (Wingate, cité par Tack, 2002). Les granitoïdes correspondent aux âges des granites Gr1, Gr2 et Gr3 précédemment définis avec la méthode Rb-Sr (1330 et 1185 Ma ;). Les intrusions basiques et ultrabasiques de Kabanga – Musongati (KM) localisés dans la zone frontière des deux domaines, précédemment datées à 1275 Ma, apparaissent être mises en place à cette période, il en est de même de intrusions basiques des groupes de Kavumwe et Bukobe Sandstone du domaine externe oriental ;

- autour de 1205 Ma suit la mise en place de petits corps de granitoïdes post-orogéniques, notamment les granitoïdes alcalins de Gitega – Makebuko – Bukirasazi, accompagnés de intrusions basiques mineures ;

Durant le néoprotérozoïque, une réactivation de la ceinture Kibarienne a été mise en évidence au Burundi :

- les pegmatites à tantale et nobium (Ta-Nb) se sont mises en place autour de 970 Ma, en même temps que la minéralisation à étain localisée dans le domaine interne occidental du Nord du Burundi qui renferme aussi les minerais de Sn, Nb, W,Ta, Li, Be et de l'or primaire (Brinckmann et al; 2001) ;

- autour de 750 Ma, le complexe alcalin de la haute Ruvubu « upper Ruvubu-Matongo) incluant un carbonatite avec une minéralisation primaire et secondaire de phosphates est intrudé au NW du Burundi ;

- le dépôt des veines irrégulières de bastnaésite de Gakara est daté à 590 Ma ;

- autour de 535 Ma, la minéralisation de l'or se met en place au NW du Burundi comme résultat de la circulation du fluide hydrothermal ;

De tout ce qui précède, il s'avère nécessaire de revoir la carte géologique du Burundi, en y apportant les modifications nécessaires ; en revoyant notamment la position des formations de Kavumwe et Nkoma dans la colonne lithostratigraphique. En plus, des études approfondies devraient être menées concernant le Groupe de Rusizi qui a été assimilé au Burundien depuis quelques années. En effet, ce dernier groupe, d'âge paléoprotérozoïque, réapparaît dans les études récentes, (Schutter,1997 ; Tack et al., 2002).

II.6. Pédologie

A cause de son climat contrasté et de son relief varié, le Burundi présente une grande variété de sols. En 1963, Van Wambeke a fait un inventaire global des sols du Rwanda et du Burundi en cartographiant les grandes associations pédologiques du Rwanda et du Burundi. Cette étude a permis d'identifier des principaux types de sols et de leur répartition géographique en fonction de l'altitude, des grandes formations végétales naturelles et des complexes paysagiques. Par la suite ,de nombreux travaux pédologiques ont été réalisés par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi en collaboration avec l'Université de Louvain.

Au Burundi, on distingue au moins 10 grandes associations pédologiques différentes (Reekmans, 1975):

- associations du fond du graben ;
- associations de phyllades ;
- associations de la forêt de montagne ;
- associations des prairies d'altitude ;
- associations des régions latéritisées à relief tabulaire ;
- associations de roches basiques ;
- associations de lithosols ou crêtes quartzitiques ;
- associations du Bugesera périphérique ;
- associations du Moso ;
- associations des alluvions et des sols organiques.

Les associations des régions latéritisées sont nettement dominantes et occupent près de la moitié du territoire du Burundi.

Diverses études pédologiques ont été réalisées : Frankart, Sottiaux et Ntoranye (1965), Opdecamp & Sottiaux (1987) et Bigura (1991), Tessens (1993), Goemaere et al. (1993). nous présentons ci-dessous un aperçu des sols présents dans les différentes régions du Burundi.

Deux types de sols ont fait l'objet d'études assez complètes, il s'agit des kaolisols qui occupent la majeure partie du pays, et les vertisols qui sont localisés la plaine de l'Imbo (plaine de la Rusizi et petites plaines riveraines du lac Tanganyika).

Les kaolisols ont été étudiés par Opdecamp et Sottiaux (1987), ces sols occupent près de 80% de la superficie du Burundi et sont particulièrement représentatifs des régions de moyenne et haute altitude. Cinq types de kaolisols ont été identifiés:

- les hydrokaolisols ou kaolisols hydromorphes qui se différencient dans les matériaux d'apport colmatant les dépressions du réseau hydrographique, où il sont associés à des matériaux récents à hydromorphie ;

- les kaolisols humifères ou kaolisols non hydromorphes sont représentatifs des régions de haute altitude, supérieure à 1750 m. Leur matériaux dérive principalement des formations schisteuses, schisto-gréseuses et micacées ;

- les hygrokaolisols ou kaolisols non hydromorphes et non humifères qui ne restent pas secs qu'au maximum 2 mois dans la plupart des années. Ils couvrent les régions de haute altitude, dans des paysages accidentés à montagneux. Ce sont des hygroferrisols développés dans des matériaux très lourds dérivés de schistes à influence basique ;

- les hygroxérokaolisols : kaolisols non hydromorphes et non humifères qui restent secs plus de deux mois dans la plupart des années, leur matériau parental est argileux à argileux très lourd. Ils caractérisent la majorité des terres situées à l'Est de la crête Congo-Nil et sont dominants dans le pays ; ils caractérisent les paysages ondulés à vallonnés, fréquemment latéritisés, dans des matériaux parentaux de nature diverses.

Dans les régions de moyenne et haute altitude, les sols sont très variables et en relation directe avec les matériaux parentaux et la topographie. Sur le versant occidental de la crête Congo-Nil, ils appartiennent à l'association des phyllades. Dans le fond des vallées, ce sont des ferrisols humifères développés au départ des roches basiques qui y dominent. Sur le versant oriental, on trouve des sols récents et instables (altérites) dérivant des phyllades ou des micaschistes sous-jacentes. Sur les pentes les plus fortes, l'altérite a complètement disparu, laissant ainsi apparaître en surface des sols squelettiques dérivés des quartzites et des phyllades.

La crête Congo-Nil montre deux associations caractéristiques : les associations de la forêt de montagne, localisées dans le Nord, et les associations des prairies d'altitude, qui dominent dans le Sud.

Au Nord où la forêt est dense, une litière épaisse recouvre un horizon humifère profond . Dans cette région de sols forestiers, les affleurements de lithosols sont fréquents. Au Sud la forêt a été entamée de longue date, des prairies se sont installées présidant à l'édification de sols particuliers à horizon humifère réduit et à litière quasi nulle.

Sur les sommets de la crête, on retrouve des sols superficiels, lessivés et instables. Leur couche humifère est très réduite voire souvent inexistante. Les affleurements rocheux sont nombreux et en pleine extension.

Les sols des plateaux centraux, qui se trouvent en contrebas de la bordure orientale de la crête, sont constitués de sédiments burundiens. Sa structure pédologique est complexe ; l'association des régions latéritisées à relief tabulaire y est de loin la mieux représentée. Les sommets arrondis des collines sont constitués de ferralsols humifères granuleux ; des associations plus argileuses occupent le fond des vallées.

L'association de roches basiques comporte des ferrisols humiques dérivés de schistes et de roches basiques avec quelques inclusions de ferralsols humifères, de grenailles latéritiques et de kaolisols liés surtout aux fonds de vallées. Les sommets des collines sont constitués de ferralsols humifères sur grenaille latéritique.

Dans la dépression du Nord-Est , ce sont les associations dites du Bugesera périphérique qui y occupent les espaces les plus importants. Elles se

caractérisent par leurs xéro-ferralsols et leurs affleurements latéritiques. Elles occupent surtout les sommets de plateaux ; les pentes sont constituées de xéro-ferrisols graveleux et minces, tandis que les fonds de vallées abritent des vertisols et des xérokaolisols.

La dépression du Moso, située au Sud-Est du Burundi, se présente sous forme d'une plaine d'effondrement et à ce point de vue offre bien des analogies avec la plaine de la Rusizi. Le Moso est en grande partie occupé par des associations dites du Moso ; elles comportent des xéro-ferralsols dérivés de roches diverses et disposés sur des reliefs peu ou pas ondulés. Elles comportent aussi des xéroferrisols qui entourent les affleurements rocheux et dominent les vallées ; les xérokaolisols sont limités aux bas de pentes.

Goemaere et al. (1993) ont étudié les vertisols (argiles noires tropicales) de la plaine de l'Imbo (plaine de la Rusizi et plaines riveraines du lac (fig.II.23). Ses sols se caractérisent par leur contenu important en argiles gonflantes.

La formation de vertisols dans la plaine de l'Imbo est liée à l'alternace de saisons contrastées, une température annuelle élevée et des petits bassins à drainage externe entravé. Deux types particuliers de vertisols sont connus dans la plaine:

- les vertisols topomorphes qui se développent sur des dépressions morphologiques mal drainés (cuvettes, plaines et dépressions fermées), sur un substrat composé d'alluvions et de colluvions. Ils sont localisés dans les plaines de la basse Rusizi, de Rumonge et de Nyanza-lac ;

- les vertisols paléotopomorphes, limités dans la plaine de la moyenne Rusizi, se développent sous l'influence conjointe de la néotectonique du Rift et de la présence de coulées basaltiques issues du champ volcanique du Sud-Kivu.

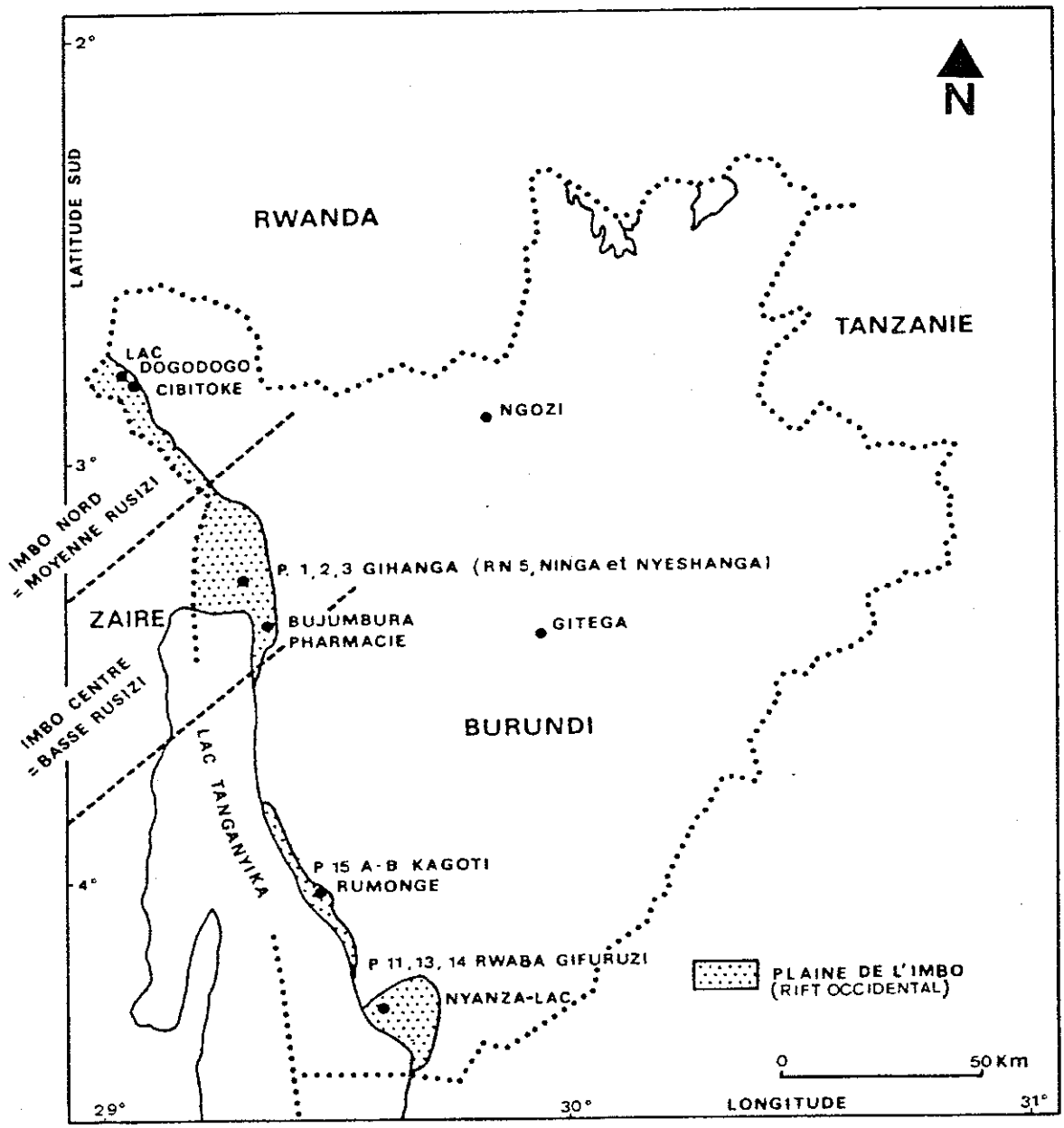


Fig.II.23 : Carte géographique et localisation des zones d'affleurement étudiées porteuses de vertisols (Geomaere et al., 1993).

En plus des vertisols, on observe dans la plaine de la Rusizi des sols restreints en superficie : sols halomorphes , sols bruns, régosols et podzols.

La formation des sols halomorphes est influencée par des sels solubles, ils comprennent les solontchaks (sols salés) et les solonetz et se caractérisent par leur grande richesse en éléments minéraux (Ca, Na, Mg, K). Ces sols se développent sur les alluvions de la Rusizi.

Les sols bruns sont riches en matières organiques et se développent sur des dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi et sur les dépôts lacustres. Les régosols sont situés sur les alluvions fluviatiles de la Rusizi ou de ses affluents, ils possèdent un horizon humifère très épais et de couleur foncé. Les podzols sont des sols sableux localisés sur les dépôts lacustres de la basse Rusizi.

L'étude minéralogique des vertisols et les connaissances de la géologie et des processus d'altération opérant sur la dorsale Congo-Nil ont permis d'identifier les sources des matériaux, la direction des apports et le mode de transport des matériaux. Les mécanismes de génération des minéraux composant les vertisols sont résumés à la figure II.24.

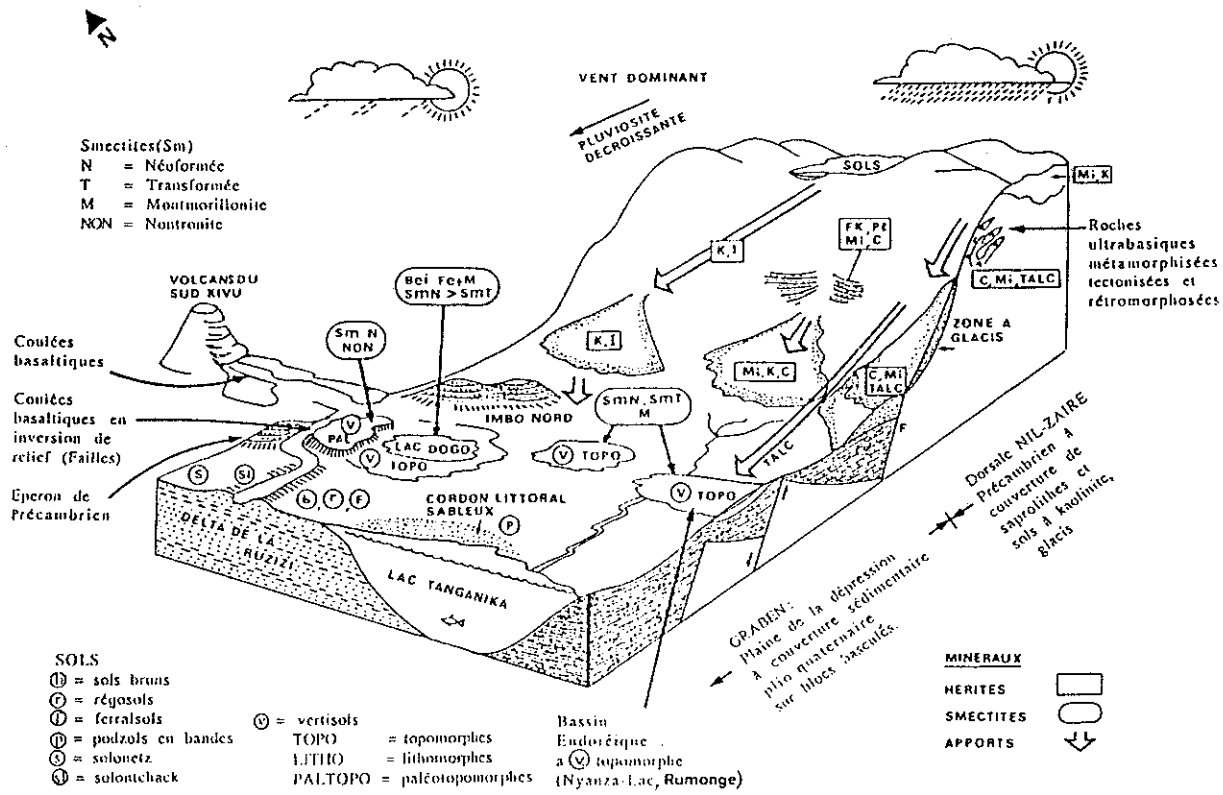


Fig.II.24 : Bloc diagramme schématique présentant les différents mécanismes (héritage, néoformation, transformation) responsables de l'association des vertisols de la dépression du Rift Tanganyika (Goemaere et al. ;1993).

Les mécanismes principaux contrôlant la nature et l'abondance relatives des espèces minérales sont l'héritage, la néoformation et la transformation. L'altération des roches parentales libère les kaolinites, illites, micas, chlorites et talc. Ces minéraux sont incorporés aux vertisols en formation à la faveur d'un héritage épisodique, issus du décapage en altitude des sols, véhiculés par les cours d'eau traversant les petits bassins endoréïques. Les minéraux hérités subissent à leur tour des transformations in situ (illites, micas et chlorites), ou restent intacts dans le profils (kaolinite et talc).

II.7. Eaux souterraines

En fonction des unités géologiques présentes , Monjoie, (1981) a identifié les différents types de nappes aquifères.

II.7.1. Nappes du substratum

a. ***Nappes des calcaires du Moso***

Les formations calcaires du Moso situées dans le Malagarasien, sont affectées par de nombreuses failles et sont susceptibles de contenir une nappe importante logée dans les fissures du massif, éventuellement élargies par les phénomènes de dissolution. La structure générale du secteur, étudiée par Waleffe (1965), permet d'espérer des réserves importantes dans cette zone, principalement dans les calcaires dolomitiques de la Musasa et les calcaires silicifiés de Bugongo.

b. ***Nappes de quartzites***

Les formations quartzitiques sont abondantes dans le Burundien, principalement dans l'assise inférieure et de vastes massifs arénacés s'étendent notamment en bordure septentrionale de la plaine du Moso (surtout dans la formation de Nkoma), dans la région de Ruyigi et Cankuzo, dans la région de Makamba, de même qu'au Sud de Karuzi. Ces massifs sont susceptibles d'être aquifères, en raison du degré de fissuration élevé. De nombreuses sources sont observées au pied de ces formations, principalement au contact quartzite/schistes.

c. Nappes en contact entre les massifs éruptifs et les quartzites

Les massifs éruptifs sont généralement intrudés au contact du socle avec le Burundien inférieur constitué de quartzites. Ces zones sont fortement fissurées et présentent des possibilités aquifères intéressantes . En effet, outre les fissures des formations quartzitiques, on constate généralement une altération importante des roches éruptives qui se transforment en arènes granitiques permettant l'instauration de nappes, perméables en petit.

Les roches pélitiques encadrant les formations quartzitiques jouent le rôle de barrière imperméable et de nombreuses sources de débordement sont observées en bordure de ces massifs.

II.7.2. Nappes alluviales

a. ***Plaine de la Rusizi***

Dans le cadre de l'implantation de paysannats dans la plaine de la Rusizi, de nombreux forages hydrologiques y ont été réalisés depuis 1953. Les formations
alluviales présentent des allures lenticulaires en sorte que les débits susceptibles d'être obtenus, sont très variables.

b. Zone au Sud de Bujumbura

Du point de vue lithologique, les plaines riveraines du lac (Kabezi, Rumonge et Nyanza-lac) présentent des caractéristiques assez semblables à la Rusizi, mais leur extension est plus faible que celle de la plaine de la Rusizi.

c. Plaine du Moso

Les forages réalisés dans cette région ont recoupé la nappe à des profondeurs variables. Dans l'ensemble, les dépôts alluviaux s'étendent sur 15 à 30 m d'épaisseur et sont constitués d'alternances d'argiles, sables et graviers. Les forages réalisés n'ont généralement été testés qu'à des débits faibles de l'ordre de 4 m^3/h.

Quelles sont les potentialités aquifères de la plaine de la Rusizi ? Dans les chapitres qui suivent, nous allons tenter de répondre progressivement à cette question. Nous présentons ci-après une synthèse détaillée de toutes les études menées dans la plaine ainsi que dans son environnement immédiat, à savoir le bassin supérieur de la Rusizi.

III. Synthèse des études antérieures des bassins de la Rusizi

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord brièvement les différentes formations géologiques qui couvrent la partie supérieure des bassins de la Rusizi ; nous discutons ensuite de la géologie de la plaine. Des coupes géologiques Est-Ouest seront proposées et enfin, un schéma interprétatif de la structure tridimensionnelle sera présentée.

Les contreforts orientaux et la crête sont constitués par les roches précambriennes dont les lithologies dominantes sont :

- les métasédiments et les granites qui occupent les contreforts de la plaine : ce sont des gneiss, des micaschistes, des lentilles de calcaires dolomitiques. A plusieurs endroits, ces roches ont été traversées par de nombreuses injections magmatiques ;

- les quartzites stratifiés avec intercalations phylliteuses surmontés par des phyllites très altérées;

- les métapélites fort redressées qui recouvrent toute la crête Congo-Nil : ce sont des schistes dans lesquels sont intercalés des amphibolo-chloritoschistes, avec de minces niveaux quartzitiques.

La plaine de la Rusizi, qui occupe la partie septentrionale du fossé du lac Tanganyika, est couverte de sédiments d'âge cénozoïque. Ce sont des dépôts sableux lacustres recouverts par des dépôts fluviatiles à dominante argileuse. Ilunga (1984) y distingue des formations d'âge holocène, pléistocène supérieur et pléistocène moyen.

Quelques alluvions d'âge holocène et d'extension réduite se rencontrent dans les régions montagneuses en dehors de la plaine de la Rusizi.

Dans la plaine de la moyenne Rusizi, on peut observer des collines résiduelles avec quelques éperons de roches précambriennes pouvant atteindre 1400 m.

Des laves tholéïtiques et alcalines (Tack et al., 1983,1987) sont observées dans la partie septentrionale de la plaine ; elles font partie de la province volcanique du Sud Kivu.

III.2. Géologie des bassins

Les formations qui couvrent les bassins sont reprises sur la figure III.1 extraite de feuilles géologiques au 1/100.000 ; feuilles Bujumbura, Cibitoke, Ngozi et Gitega, réalisées par le Département de Géologie et de Minéralogie du Musée Royal de l'Afrique Centrale (Tervueren, Belgique) en collaboration avec le Ministère des Travaux publics, de l'Energie et des Mines du Burundi.

III.2.1. Roches précambriennes

Du point de vue géologique, les bassins de la Rusizi sont constitués par des formations précambriennes entièrement rattachées au Protérozoïque moyen (Supergroupe du Burundi). Elles appartiennent au compartiment occidental du Burundien formé d'ensembles tectono-métamorphiques, regroupés en complexes et qui occupent en grande partie les contreforts de la plaine et, d'ensembles sédimentaires regroupés en formations lithostratigraphiques qui couvrent la crête. La figure III.1 montre la localisation et l'étendue de ces différents ensembles.

III.2.1.1. Dans les Contreforts de la plaine

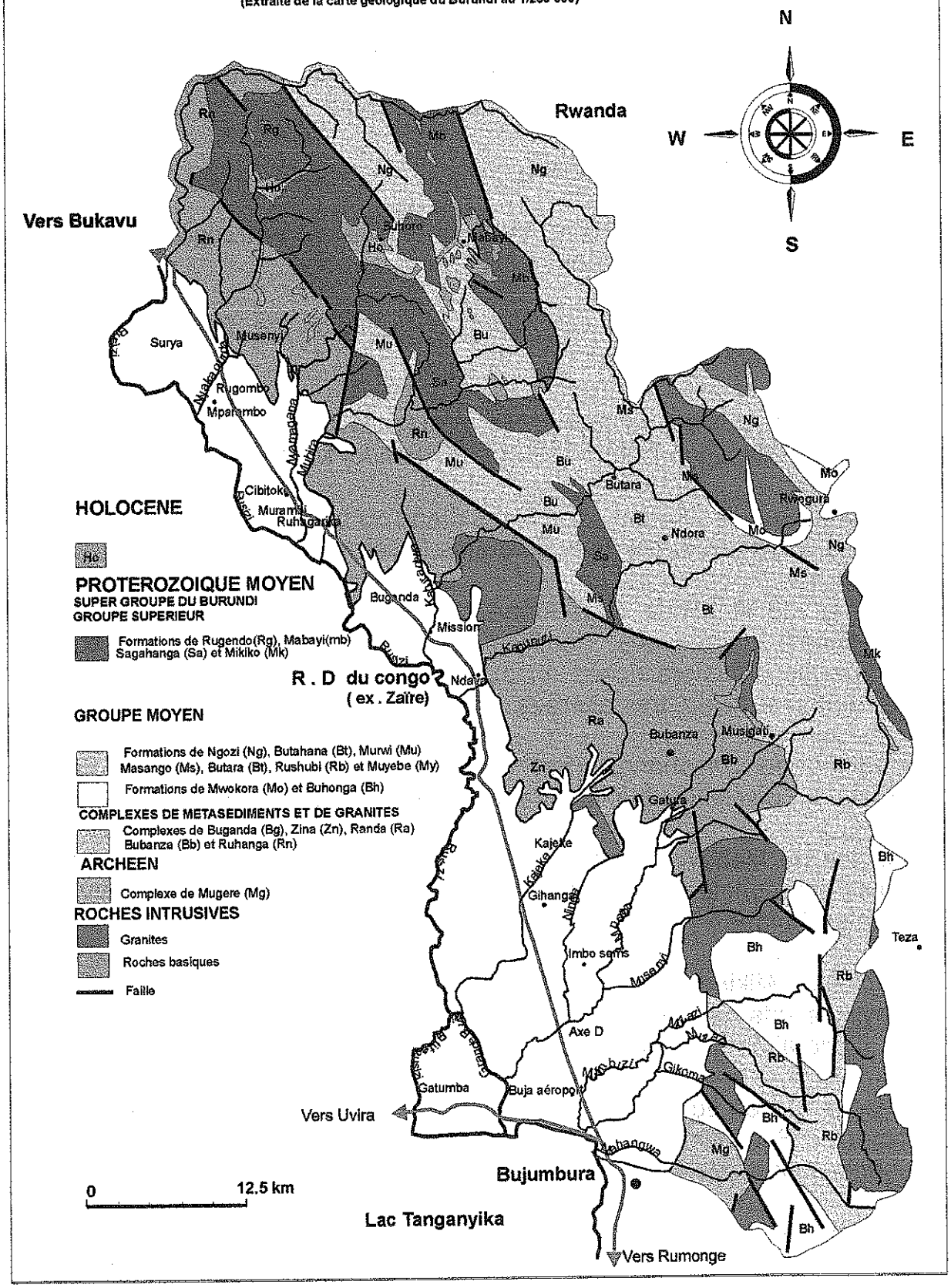
Du Nord au Sud, on rencontre :

- le complexe de Ruhanga (Rn), formé principalement de pélites avec de nombreuses amphibolites, des phyllites carbonatées ainsi que quelques niveaux quartzitiques. Ce complexe s'étend de la rivière Ruhwa jusqu'à la rivière Muhira ;

- le complexe de Buganda (Bg), plus métamorphique que celui de Ruhanga. Il comprend des gneiss migmatiques, des micaschistes, des orthogneiss, des paragneiss et des lentilles de calcaires dolomitiques, ainsi que quelques niveaux quartzitiques. Il s'étend sur les bassins de la Muhira et Kaburantwa ;

- le complexe de Zina-Randa (Zn-Ra) qui occupe les contreforts du bassin de la Kagunuzi, est constitué par les faciès de Zina et Randa. Le faciès de Zina comprend des orthogneiss, des amphibolites, des micaschistes à sillimanite, des paragneiss et quelques niveaux quartzitiques. Le faciès de Randa comprend des amphibolo-chloritoschistes, phyllites et micaschistes et des bancs de lentilles de calcaires dolomitiques et de schistes calcareux.

Fig III.1 : Carte géologique des bassins versants orientaux de la Rusizi
(Extraite de la carte géologique du Burundi au 1/250 000)



- le complexe de Bubanza (Bb) : il s'agit d'une lithologie métasédimentaire dont l'identification précise est rendue difficile par la présence de nombreuses injections pegmatitiques, concordantes au litage de l'encaissant. Ce dernier est principalement constitué par des bancs gréseux, psammitiques alternant avec des niveaux plus pélitiques. Le complexe est localisé dans le bassin de la Mpanda.

III.2.1.2. Dans la crête Congo-Nil

Dans cette partie du bassin, les ensembles lithostratigraphiques du Supergroupe du Burundi forment deux Groupes :

- le Groupe supérieur qui comprend la formation de Rugendo-Mabayi-Sagahanga (Rg-Mb-Sa) ;

- le Groupe moyen qui comprend les formations de Butahana-Murwi-Ngozi (Bu-Mu-Ng) ; Masango-Butara (Ms-Bt) et Rushubi-Muyebe (Ru-My).

Du Nord au Sud, le Groupe supérieur s'étend du bassin de la Nyakagunda à celui de la Kagunuzi et présente différents faciès :

- le faciès de Rugendo (Rg) formé de quartzites blancs stratifiés avec intercalations phylliteuses, lentilles de quartzites gris foncé et de conglomérats grossiers riches en oxyde de fer. Plus haut, on trouve des phyllites gris-vert clair, très altérées ;

- le faciès de Sagahanga (Sa) constitué de quartzites et grès fins à grossiers et de schistes blancs, grauwackes et psammoschistes ;

- le faciès de Mabayi (Mb) formé de quartzites et grès fins à grossiers et lentilles microconglomératiques, de phyllites grises intercalés et de niveaux de grauwackoïdes ;

- le faciès de Mikiko (Mk) formé de quartzites et de fragments peu arrondis de phyllites gris verdâtre. Au dessus, on observe un ensemble détritique formé d'une alternance de psammoschistes et de quartzites mal classés.

Le Groupe moyen occupe la plus grande partie de la crête et est représenté du Nord au Sud par les formations de Ngozi-Butahana-Murwi (Ng-Bu-Mu), Masango-Butara (Ms-Bt) et Rushubi-Muyebe.

- le faciès de Ngozi (Ng) présente un métamorphisme assez élevé. Il est composé de phyllites et micaschistes gris à gris-vert, homogènes et rubanés, de chloritoschistes, de laves amygdalaires avec quelques intercalations de niveaux graphiteux ;

- le faciès de Butahana (Bu) formé de métapélites sombres, rubanées grises et gris-vert avec niveaux graphiteux. On y trouve également des roches carbonatées, calcaires dolomitiques et quelques rares quartzites. Des roches volcaniques (laves amygdalaires) et des volcanosédiments sont également présents ;

- le faciès de Murwi (Mu) est constitué de pélites et gréso-pélites grises parfois noires par altération. Des roches amphibolitiques sont localement signalées ;

- le faciès de Masango (Ms) comprend des phyllites grises et vertes avec quelques rares intercalations quartzitiques et des niveaux de métavolcanites basiques ;

- le faciès de Butara (Bt) est formé d'une alternance de pélites de la formation de Ngozi et de quartzites feldspathiques de la formation de Sagahanga. Outre la lithologie à prédominance pélitique, elle comprend une proportion considérable de roches psammitiques (Nahimana,1988), par endroits feldspathiques ;

A l'Est du bassin de la Kagunuzi, on observe des séquences de quartzites en bancs décimétriques, avec des intercalations de niveaux micaschisteux qui constituent la formation de Mwokora.

Les sédiments qui constituent la formation de Rushubi-Muyebe (Rb-My) sont pélitiques. On y trouve des faciès différents résultant de la phase sédimentaire et des degrés de métamorphisme variables d'une zone à l'autre.

Le faciès de Rushubi (Rb) est essentiellement pélitique et de couleur verte, grise et localement noire. Ce sont des phyllites et, par endroits, des micaschistes à chloritoïde, grenat, staurotide et biotite.

Le faciès de Muyebe (My) est plus métamorphique que celui de Rushubi ; ce sont également des phyllites mais plus gréseuses avec de minces niveaux quartzitiques. Il contient localement des métavolcanites basiques, des amphibolites, des chloritoschistes et des volcanosédiments.

III.2.2. Magmatisme

Le magmatisme dans les bassins de la Rusizi est matérialisé par la présence de granites, pegmatites et roches basiques. Le magmatisme granitique et basique de la chaîne kibarienne du Burundi a fait l'objet de nombreuses études : (Liégeois et al., 1982 ; Ntungicimpaye, 1984 ; Fernandez-Alonso et al., 1986 ; Klerkx et al., 1987 ; Tack et Nkurikiye, 1993).

III.2.2.1. Granites

Les granites rencontrés dans le bassin de la Rusizi sont :

- le granite de Kigarama : de type Gr2 , à texture gneissique, souvent porphyrique, à deux micas ; il contient quelques enclaves sédimentaires ;

- le granite de Kaburantwa : situé en bordure de la plaine, de part et d'autre de la rivière Kaburantwa. C'est aussi un granite porphyrique avec une prédominance de la biotite sur la muscovite. Il rappelle le type Gr1, mais les faciès en bordure, à texture gneissique, rappellent le type Gr2, souvent à deux micas ;

- les granitoïdes de la Mugere, situés en bordure de la basse plaine. Leurs faciès sont excessivement variés. A l'affleurement, ils présentent une texture porphyrique à deux micas. Ils sont identifiés comme de type Gr2 . Selon Theunissen (1989), il est très probable que les terrains granitiques de la Mugere comportent aussi des intrusions de types Gr1 et Gr3 ;

- des pointements isolés de granites gneissiques sont observés dans les formations de Rushubi-Muyebe et Rugazi ainsi que dans les complexes de Zina et Buhonga. Ils sont interprétés comme étant en relation avec les granitoïdes de la Mugere.

III.2.2.2. Pegmatites

Les pegmatites sont très répandues dans les bassins de la Kaburantwa, Kagunuzi et Mpanda, tant dans les terrains granitiques que ceux métamorphiques. On les trouve dans les complexes de Ngozi, Masango-Butara, Muyebe, Bubanza et Zina-Randa. En général, elles sont à muscovite et tourmaline noire.

Traditionnellement, les pegmatites du Burundi étaient considérées comme étant associées aux granites kibariens. Des études récentes (Tack & Nkurikiye, 1993) ont mis en doute cette association. En effet, les pegmatites sont connues aussi bien dans le socle anté-kibarien de la Mugere (Nzojibwami, 1987), dans le socle de Nyanza-Lac (au Sud du pays) que

dans les roches kibariennes telles que les granitoïdes et/ou les métasédiments.

Une pegmatite lithique minéralisée de Ndora (Fransolet & Tack, 1990 ; Jacquemin, 1991 ; Ntahonganyira, 1993) a un âge rattaché aux granites stannifères post-kibariens datés à 980 Ma (Cahen et al., 1984).

Une pegmatite de la Mugere a donné un âge Rb-Sr sur roches totales de 967 ± 8 Ma (Brinckmann et al., 1987), tandis que le granite de la Mugere a été daté de 1261 ± 25 Ma (Klerkx et al. ; 1984 ;1987), son âge étant donc antérieur de quelques 300 Ma à celui de la pegmatite de Ndora. L'étude de Tack & Nkurikiye (1993) a abouti aux conclusions suivantes :

- soit les pegmatites sont franchement postérieures aux granites (auquel cas elles n'y sont pas directement liées et les granites et les pegmatites constituent deux phénomènes distincts) ;

- soit il existe plusieurs générations de pegmatites d'âges différents.

III.2.2.3. Roches basiques

Les roches magmatiques basiques et/ou intermédiaires sont localisées dans les bassins de la Nyamagana et Muhira ainsi que dans la région de Mageyo.

Le magmatisme basique à intermédiaire de Butahana a été étudié par Kolbenstetter (1986) ; il peut s'agir du magmatisme basique ou des corps subvolcaniques du Kibarien (Ntungicimpaye, 1984) .

Le magmatisme basique de la région de Mageyo a fait l'objet d'une étude détaillée (Ntungicimpaye, 1984) ; il s'agit des métabasaltes souvent à amygdales, d'amphiboloschistes ainsi que de sills, dykes et petits plutons de métadolérites et de métagabbros.

De nombreux corps de gabbros amphibolitiques foliés sont également présents ; ils sont parallèles aux séquences granitiques.

Des roches basiques, parfois des amphibolites, sont fréquentes dans le granite de Kigarama . D'après Ntungicimpaye, les roches basiques observées dans le Burundien sont des métagabbros à amphiboles, des dolérites et des laves effusives à amygdales.

III.3. Plaine de la Rusizi

Dominée à l'Est et à l'Ouest par les contreforts atteignant parfois plus de 3000 m d'altitude et fermée au Nord par les coulées basaltiques du Sud Kivu, la plaine est marquée par la rivière Rusizi qui la traverse du Nord au Sud et collecte au passage les eaux des rivières descendant des horsts précambriens congolais et burundais.

La plaine est habituellement divisée en deux parties (Fig.III.2):

- la plaine de la moyenne Rusizi, ou partie septentrionale de la plaine , comprise entre les rivières Ruhwa au Nord et Kagunuzi au Sud ;

- la plaine de la basse Rusizi qui s'étend entre la Kagunuzi et le lac Tanganyika.

Durant les années 1953 -1958, le Service Géologique du Congo Belge et du Ruanda - Urundi a réalisé des campagnes de sondages hydrologiques en vue de l'alimentation en eau des paysannats de la plaine. Nous avons retrouvé au MRAC les archives reprenant la nature et l'épaisseur des différents terrains traversés. Elles sont en annexe du présent travail.

Tack et De Paepe (1983) ; Tack, Thouin et De Paepe (1987) ont étudié le volcanisme du Sud Kivu et ses relations avec les formations géologiques avoisinantes dans la partie septentrionale de la plaine.

Ilunga (1984) a mené une étude morphologique et stratigraphique de la plaine ;

Chorowicz et Thouin (1985) ont décrit les failles synsédimentaires et la structure de la plaine de la basse Rusizi ;

Waleffe (1985,1989) a regroupé sous forme de cartes et tableaux les données géologiques et hydrogéologiques recueillies au cours de différentes campagnes de sondages effectuées dans la plaine de la Rusizi (partie burundaise).

La région étant à vocation agricole, diverses études pédologiques ont été effectuées : Frankart, Sottiaux et Ntoranye (1965) ; Frankart et Herbillon (1971) et Tessens (1993).

Nous présentons ci-après une synthèse de ces données et proposons un schéma interprétatif montrant la structure tridimensionnelle de la géologie de la plaine.

III.3.1. Plaine de la moyenne Rusizi

La plaine de la moyenne Rusizi présente un relief tourmenté, resserré entre les piedmonts et la rivière Rusizi. Dans sa plus grande largeur, elle ne dépasse guère 10 km.

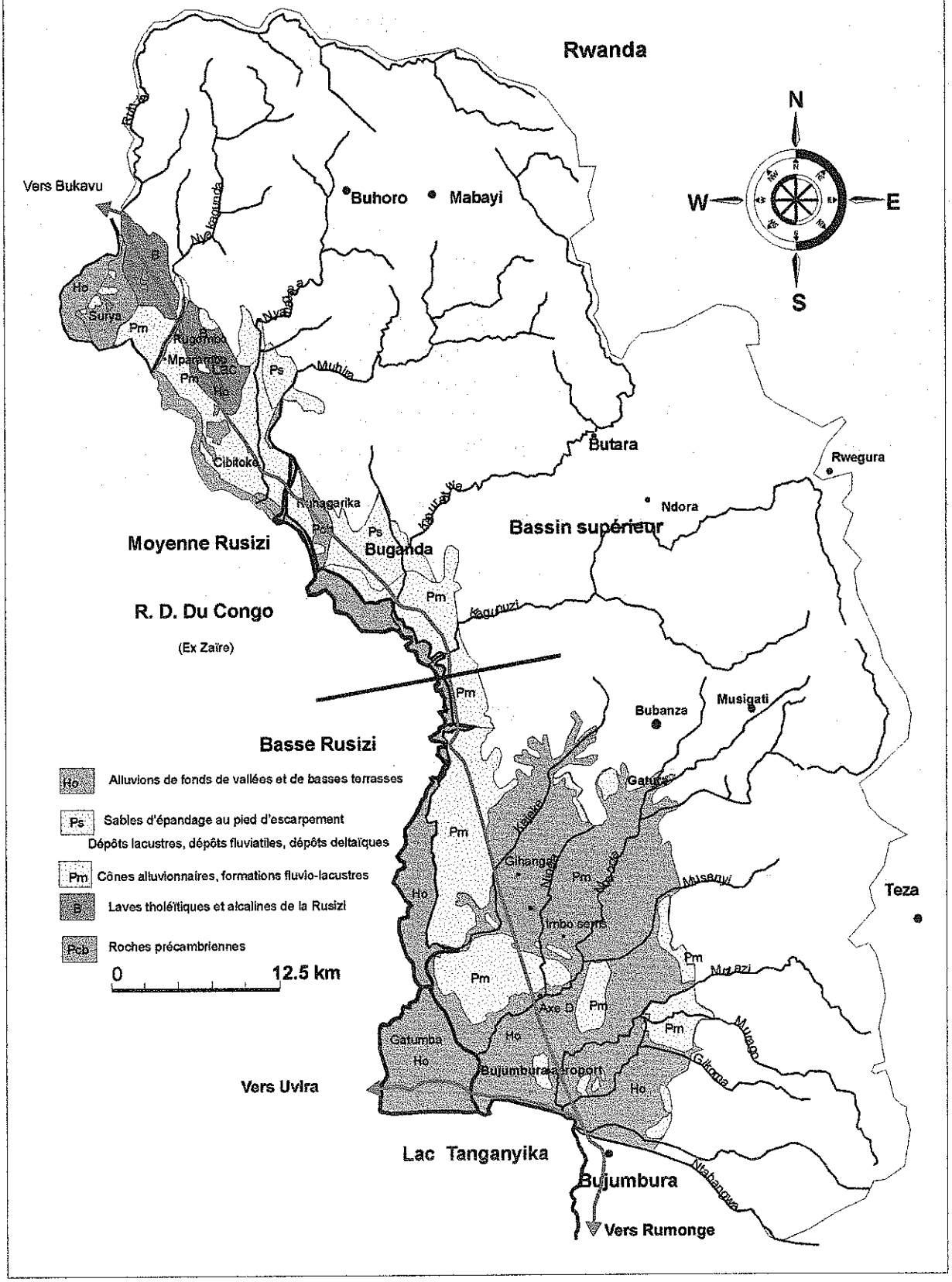
III.3.1.1. Géomorphologie

Le long de la Rusizi, le relief offre des aspects variés suivant que la Rusizi s'approche ou s'écarte des piémonts (Fig.III.3 et III.4). On a ainsi des plaines relativement larges et plates descendant en pente douce vers la Rusizi (ex : paysage de Rukana - Ruhanga), des cassures nettes comme à Ruhagarika, une suite de petites plaines séparées par des ados rocheux (ex : paysage entre Rugombo et Murambi), ou des falaises dominant directement la Rusizi (ex : Surya, Murambi et Ruhagarika). Au niveau des paysannats de Mparambo et Cibitoke, on observe une vallée large au milieu de la plaine où s'est formé le petit lac Dogodogo. Cette vallée pose un problème de circulation de l'eau de surface : faute d'exutoire naturel, les terrains agricoles sont inondés en période de pluies.

De la rivière Rusizi vers les contreforts de la plaine, les unités géomorphologiques suivantes peuvent être observées (S.H.E.R, 1987) :

- les terrasses de la Rusizi ;
- les dépôts des tributaires de la Rusizi ;
- les dépôts issus de l'altération des basaltes ;
- les collines résiduelles ;
- les formations de piémonts.

Fig.III.2 : Carte géologique de la plaine de la Rusizi
(Extraite de la carte géologique du Burundi au 1/250 000)



A. Terrasses de la Rusizi

La terrasse d'inondation, située en bordure de la rivière Rusizi, est formée des dépôts alluvionnaires récents et subit régulièrement des inondations pendant la saison de pluie. Ces inondations favorisent l'accumulation de matériaux limoneux et de sels magnésiques et sodiques, les eaux de la Rusizi étant alcalines et chargées de magnésium et sodium.

La basse terrasse est formée par les dépôts du Quaternaire récent. Ces alluvions peuvent avoir une charge graveleuse de différentes natures géologiques et peuvent contenir aussi des quantités importantes de magnésium et de sodium.

La moyenne terrasse est formée également par des dépôts alluvionnaires récents de la Rusizi, souvent à forte charge graveleuse et pierreuse. Sa topographie, légèrement ondulée, lui confère un bon drainage naturel. Elle est surélevée de 2 à 5 m par rapport aux basses terrasses. Cette terrasse est inexistante dans le secteur de Ndava où la Rusizi décrit des méandres.

La haute terrasse est surélevée d'une dizaine de mètres avec des falaises fortement érodées. Les dépôts alluvionnaires qui la composent ont dû être formés durant le Pléistocène, car ils recouvrent ou s'intercalent localement avec des matériaux issus de l'altération des basaltes.

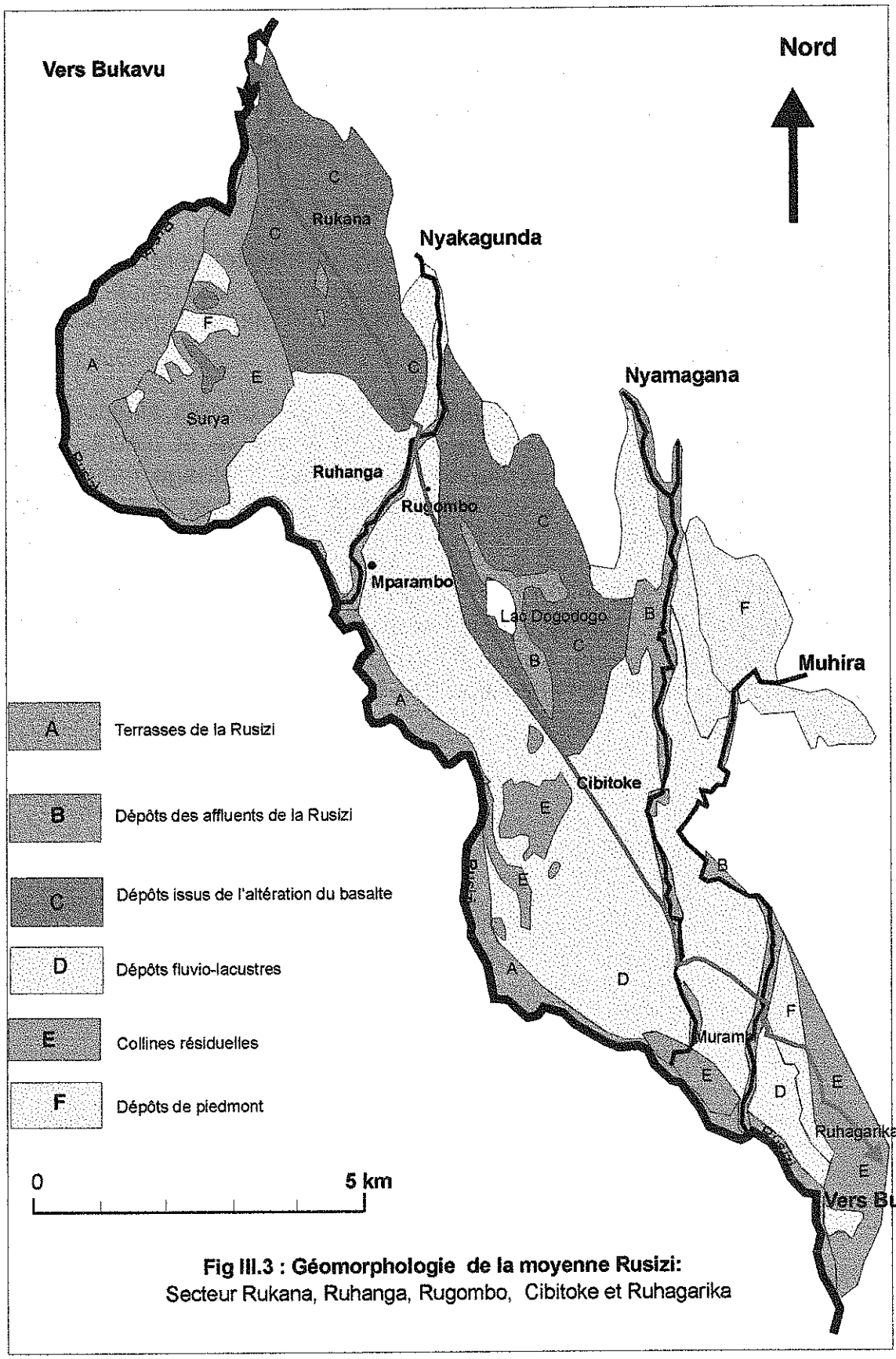


Fig III.3 : Géomorphologie de la moyenne Rusizi:
Secteur Rukana, Ruhanga, Rugombo, Cibitoke et Ruhagarika

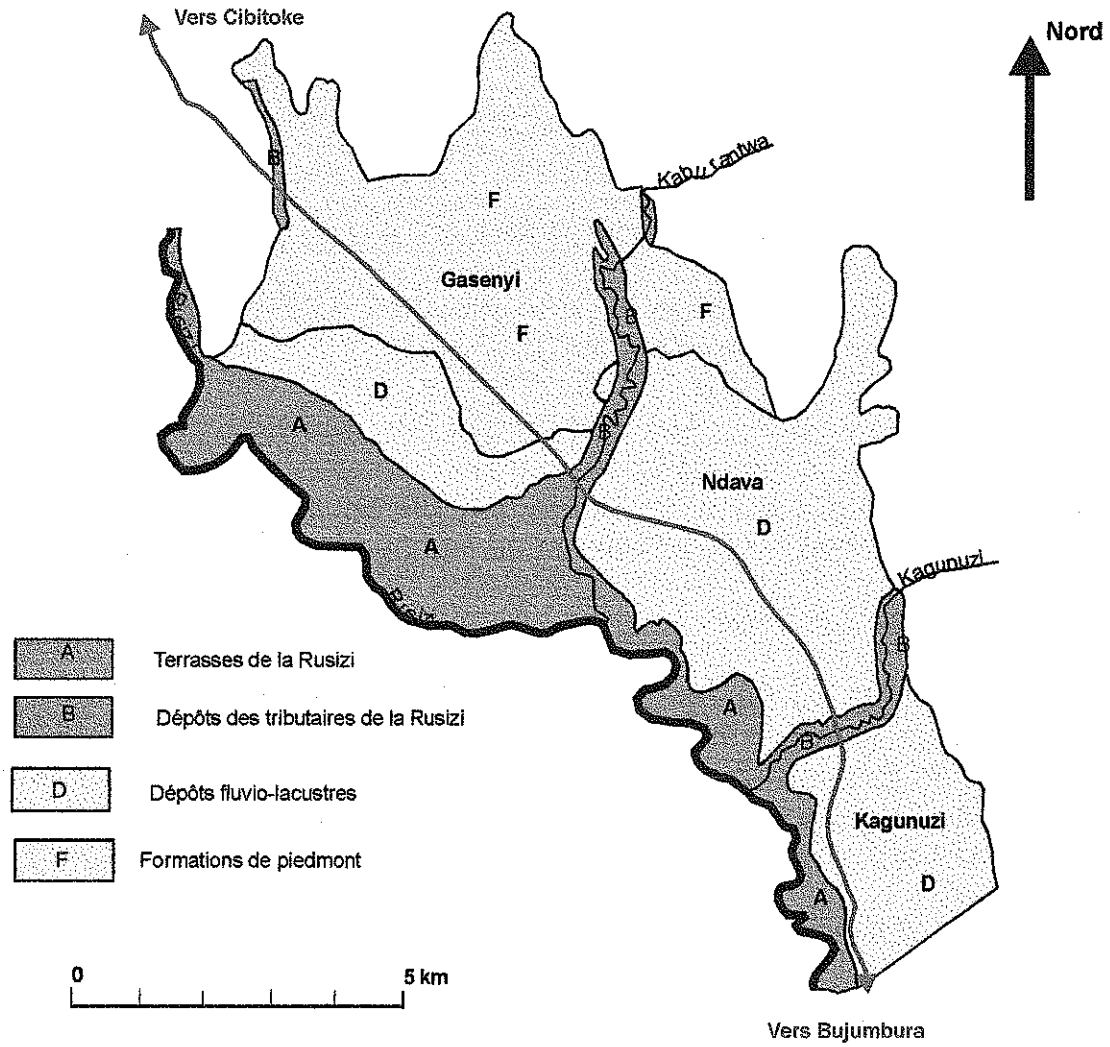


Fig.III.4 : Géomorphologie de la moyenne Rusizi

Secteur Gasenyi, Ndava et Kagunuzi

B . Dépôts des tributaires de la Rusizi

Les dépôts des affluents de la Rusizi développent des plaines alluviales basses et moyennes de petite largeur. Ils sont composés de matériaux stratifiés en relation avec les matériaux des contreforts, principalement des matériaux limoneux fortement micacés.

C. Dépôts issus de l'altération du basalte

Des affleurements de coulées basaltiques sont localisés au Nord de la plaine. A Gabiro et Rukana, elles forment une cône de déjection suivant la direction Nord-Sud, où des cailloux roulés des laves basaltiques se rencontrent fréquemment. Au Sud, dans les secteurs de Mparambo, Cibitoke et Murambi, ils occupent les replats du paysage (topographie plane et ondulée), et ils sont en contact avec la haute terrasse de la Rusizi. Ces dépôts sont rencontrés jusqu'à l'éperon de Ruhagarika (Tack.,1987).

D. Dépôts fluvio-lacustres

Il s'agit des dépôts du Quaternaire localisés surtout dans les secteurs de Gasenyi et Ndava. A Gasenyi, ces dépôts se rattachent à la haute terrasse de la Rusizi en formant une plaine. A Ndava, ces dépôts ont été fortement découpés par l'érosion. Ce sont des matériaux à forte charge graveleuse affectés par la tectonique quaternaire.

E. Collines résiduelles

Des collines résiduelles avec quelques éperons de roches précambriennes pouvant atteindre jusqu'à 1400 m d'altitude sont observées dans la plaine (Surya et Ruhagarika) et sont constituées principalement par des roches métamorphiques (micaschistes et phyllades).

F. Formations de piedmont

Les formations de piedmont sont localisées dans les zones de transition entre la plaine et les contreforts. Elles sont formées de dépôts alluvionnaires et colluvionnaires en relation avec la nature de roches avoisinantes.

III.3.1.2. Stratigraphie

D'après les travaux de Ilunga (1984), la plaine de la moyenne Rusizi est couverte par des formations d'âge holocène-pléistocène supérieur et pléistocène moyen. Le Pléistocène inférieur a été reconnu localement dans la région de Cibitoke, dans les vallées de la Nyamagana et de la Muhira, mais son extension est très limitée et n'a pas été reprise sur la carte géologique de la plaine. Les figures III.5, a et b reprennent la stratigraphie de la plaine. Spatialement, on peut distinguer :

- l'Holocène (Ho) représenté par les alluvions de la Rusizi et de ses affluents ;

- le Pléistocène supérieur (Ps) constitué principalement de dépôts sableux rouges d'épandage. Il est situé au piedmont des escarpements et est surtout représenté dans la région de Gasenyi ;

- le Pléistocène moyen (Pm) comportant des formations fluvio-lacustres allant de sables grossiers à des dépôts fins silto-argileux et à des galets de couleur rouge, transformés localement en conglomérats ferrugineux ;

- des dépôts d'âge cénozoïque indifférencié (Ci) observés à l'extrémité de la plaine, entre les rivières Muhira et Nyamagana.

Sah (1967) a effectué une étude palynologique sur les carottes des forages Ru 221 et Ru 231 qui se trouvent respectivement à Cibitoke et à Kundava.

Le forage Ru 221 a montré deux séries superposées séparées par une discontinuité :

- la formation supérieure fluvio-lacustre date du Pléistocène supérieur ou moyen ;

- la formation inférieure franchement lacustre, est datée entre le Pléistocène inférieure et le Miocène supérieur démontrant ainsi une avancée septentrionale importante du lac Tanganyika à cette période.

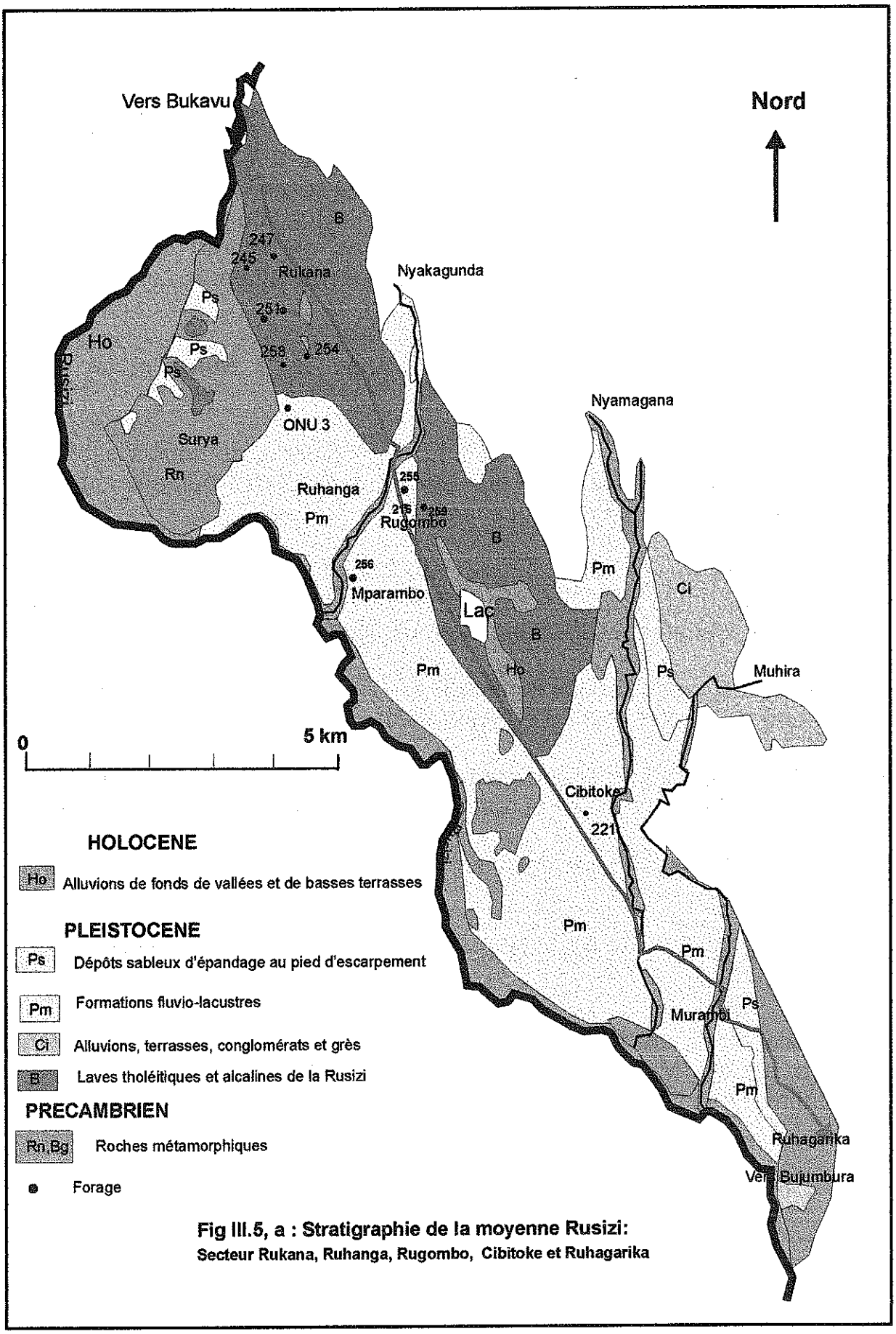


Fig III.5, a : Stratigraphie de la moyenne Rusizi:
Secteur Rukana, Ruhanga, Rugombo, Cibitoke et Ruhagarika

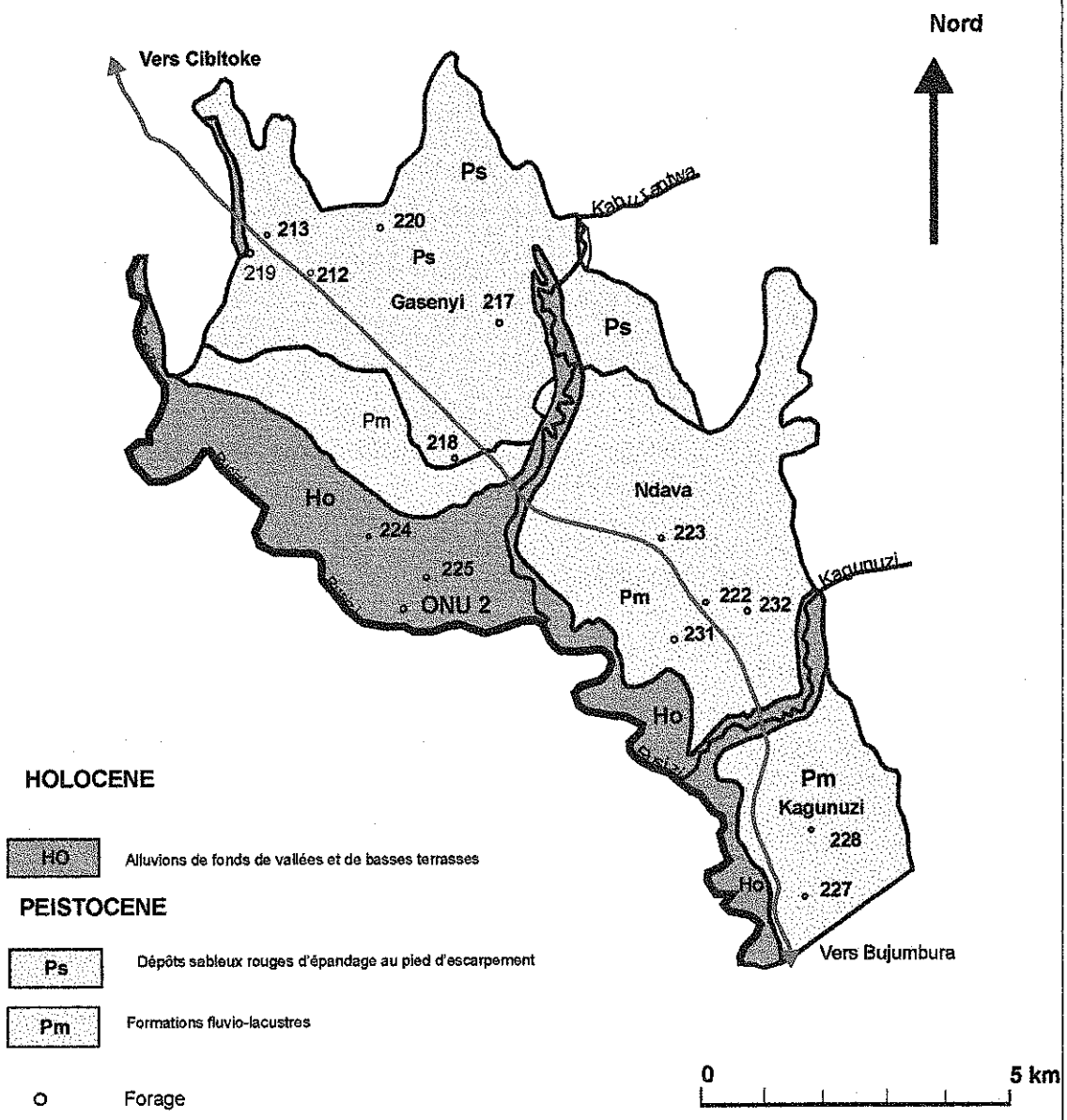


Fig.III.5, b : Stratigraphie de la moyenne Rusizi

Secteur Gasenyi, Ndava et Kagunuzi

Selon Tack (1987), dans le Nord de la plaine de la Rusizi, une réactivation récente des structures précambriennes est indiquée au voisinage immédiat délimitant les horsts précambriens par :

- des sources thermo-minérales et des dépôts de travertin ;
- un remplissage des zones de failles par des carbonates rubanés ;
- des alluvions fluviatiles récentes faillées et basculées ;
- des brèches tectoniques et des mylonites, parfois cimentées par des carbonates ou de la silice colloïdale ;
- une activité sismique ;
- une activité volcanique appartenant à la province du Sud-Kivu ; représentée au Burundi par des coulées de basaltes tholéitiques surmontés par des basaltes alcalins ;
- des restes de coulées de basaltes ou d'une terrasse fluviatile couvrant un horst précambrien.

III.3.1.3. Volcanisme

Au Nord, les dépôts fluvio-lacustres sont ceinturés par des laves volcaniques qui résultent du volcanisme du Sud-Kivu. Le volcanisme occupe l'extrémité méridionale du lac Kivu, autour de la ville de Bukavu, touchant le Sud-Ouest du Rwanda et le Nord-Ouest du Burundi (fig.III.6). Ces laves font partie des manifestations volcaniques liées à la branche occidentale du rift africain.

Le volcanisme du Sud Kivu a fait l'objet de nombreuses études :Meyer (1954) ; Villeneuve (1978), Pouclet (1980) ; Kanika et al. (1981) ; De Paepe & Fernandez-Alonso (1981) ; Mayena et al. (1981) ; Tack & De Paepe (1983), Tack, Thouin & De Paepe (1987).

Dans la partie orientale de la moyenne Rusizi, Tack & De Paepe (1983) ont étudié les caractères pétrochimiques de ces laves et leur relation avec les formations géologiques avoisinantes. Ils ont mis en évidence l'existence de plusieurs coulées basaltiques et le caractère alcalin des dites laves .

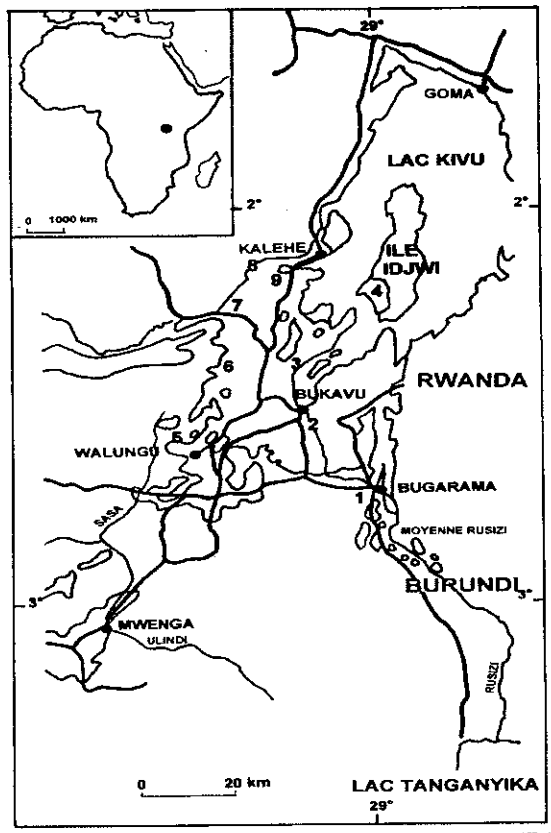
Tack (1987) a démontré que, dans cette région, le volcanisme n'est pas exclusivement effusif et fissural avec un empilement de coulées basaltiques superposées, mais qu'une certaine activité explosive et ponctuelle y a simultanément existé, caractérisé par l'édification d'appareils de projection.

On n'a jamais mis en évidence des relations simples et directes entre le chimisme des laves et leur répartition géographique ou chronostratigraphique ; on remarque de grandes différences chimiques entre des laves d'une même époque. Les différents chercheurs qui se sont penchés sur le

volcanisme du Sud Kivu soulignent également des différences pétrographiques entre les laves du Nord et celles du Sud du lac Kivu.

La datation de deux échantillons de basalte, l'un provenant des environs du confluent Ruhwa-Rusizi, l'autre du pied des contreforts à l'Est de Rugombo, ont donné des âges respectifs de 7.6 ± 1.2 et 10.0 ± 2.2 M.a (Pasteels et al., 1985).

Les laves basaltiques sont donc antérieures aux alluvions du Pléistocène inférieur associées à la plus ancienne extension lacustre connue (Ilunga, 1984, cité par Tack (1987) .



Source: d'après A. MEYER (1954), modifié par VILLENEUVE (1978)

1 à 9: principales zones d'émission des laves du lac Kivu

Figure III.6 : VOLCANISME DU SUD DU KIVU

III.3.1.4. Données géologiques et hydrogéologiques

Du Nord au Sud, la géologie de la moyenne Rusizi a été explorée par les forages implantés dans les régions de Rukana, Rugombo, Cibitoke, Gasenyi, Ndava et Kagunuzi.

A. Secteur Rukana-Rugombo

Le secteur de Rukana-Rugombo est marqué par le horst précambrien de Surya qui se situe entre les dépôts de la Rusizi et les coulées basaltiques de la province volcanique cénozoïque du Sud-Kivu.

Dans le massif de Surya, des lambeaux de basalte reposent partiellement sur des terrasses composées de gros galets de quartz et quartzite surmontant les roches précambriennes (Waleffe, 1989).

A Rukana, les forages Ru 245, 247, 250, 251, 254 et 258 ont été implantés dans les basaltes (fig.III.5, a). Ils ont traversé des argiles rouges, produits d'altération, avant d'atteindre le basalte dur à des profondeurs variant entre 5 et 38 m ; la nappe aquifère n'a pas été atteinte.

En vue de l'exploration des sources d'eau chaude du Burundi, un sondage (ONU1) a été exécuté en 1971 par le Projet de Recherches minières du PNUD sur une terrasse, à proximité des sources d'eau chaude de la Ruhwa. Il a traversé des couches de gravier et de sable avec quelques petites intercalations argileuses sur une épaisseur de 87 m; de la pyrite disséminée dans le gravier a été trouvée fréquemment mais surtout entre 39 et 48 m . Le substratum, composé de phyllites noires a été foré sur une profondeur de 12 m .

Dans ce forage, l'eau chaude a jailli dès le début du forage avec des débits légèrement croissants de l'ordre de quelques litres/seconde au fur et à mesure de l'avancement du sondage. La température de l'eau, recueillie dans le sondage, n'a pas dépassé 68°C.

En 1976, le même projet a réalisé un forage baptisé ONU3 dans la plaine de Ruhanga, à 7 km au Sud-Est des sources de la Ruhwa, à proximité du horst de Surya. Le forage a traversé une épaisseur de 120 m d'argiles grises, fines, comportant par endroits des galets roulés de roches diverses : quartz, quartzite, gneiss, basaltes. Il a ensuite traversé des basaltes altérés devenant cohérents à 132 m. Le sondage a été poursuivi jusqu' à 164 m , toujours dans les mêmes basaltes. L'eau a été atteinte à 90 m de profondeur.

Dans ce secteur, le substratum a été trouvé dans la plaine au voisinage de la cote 845 m aux sources de la Ruhwa ; il se situe en dessous de la cote 773 au sondage ONU 3, 880 m au bord de la Rusizi.

Dans la région de Rugombo, les forages Ru 216, 255, 256 et 259 ont traversé des épaisseurs de 22.8 à 63.50 m d'argile, de sable et gravier.

A 15.50 m de profondeur, le sondage Ru 216 a atteint une argile brune hétérogène, avec débris de schistes, restes de végétaux et limonite et galets de quartz. Il a été arrêté dans un sable fin, provenant probablement du broyage de gros éléments quartzeux.

B. Cibitoke

Le sous-sol de Cibitoke a été exploré par le sondage Ru 221 qui a permis de relever une discontinuité à 48 m de profondeur ; au-dessus, le forage comporte du sable grossier, des éléments de pegmatites avec de gros cailloux de quartzeux. A partir de 48 m, on trouve des schistes tendres micacés gris, avec un niveau de grès entre 51 et 62 m et des intercalations de graviers quartzeux. Vers la base, on trouve dans ces schistes tendres des lits de pyrite et de quartz broyé et roulé. Le forage s'est arrêté dans une argile correspondant vraisemblablement à des schistes (d'après le sondeur).

Entre les régions de Rugombo et Cibitoke, on observe les laves basaltiques de la moyenne Rusizi, localisées tout autour du lac Dogodogo. Si on admet que l'argile à débris de schistes puisse être corrélée avec les schistes tendres rencontrées à 48 m dans le forage Ru 216, les laves reposent alors sur ces schistes et entrent en contact vers le Sud avec le sable grossier à gros cailloux de quartz et pegmatite. C'est ce que montre la coupe géologique réalisée à partir des forages Ru 216 et Ru 221 (fig.III.7).

Une prospection géophysique utilisant les méthodes sismiques et résistives a été menée au Sud de Cibitoke, dans les alluvions de la rivière Muhira et sur les terrasses comprises entre la Muhira et la Nyamagana.

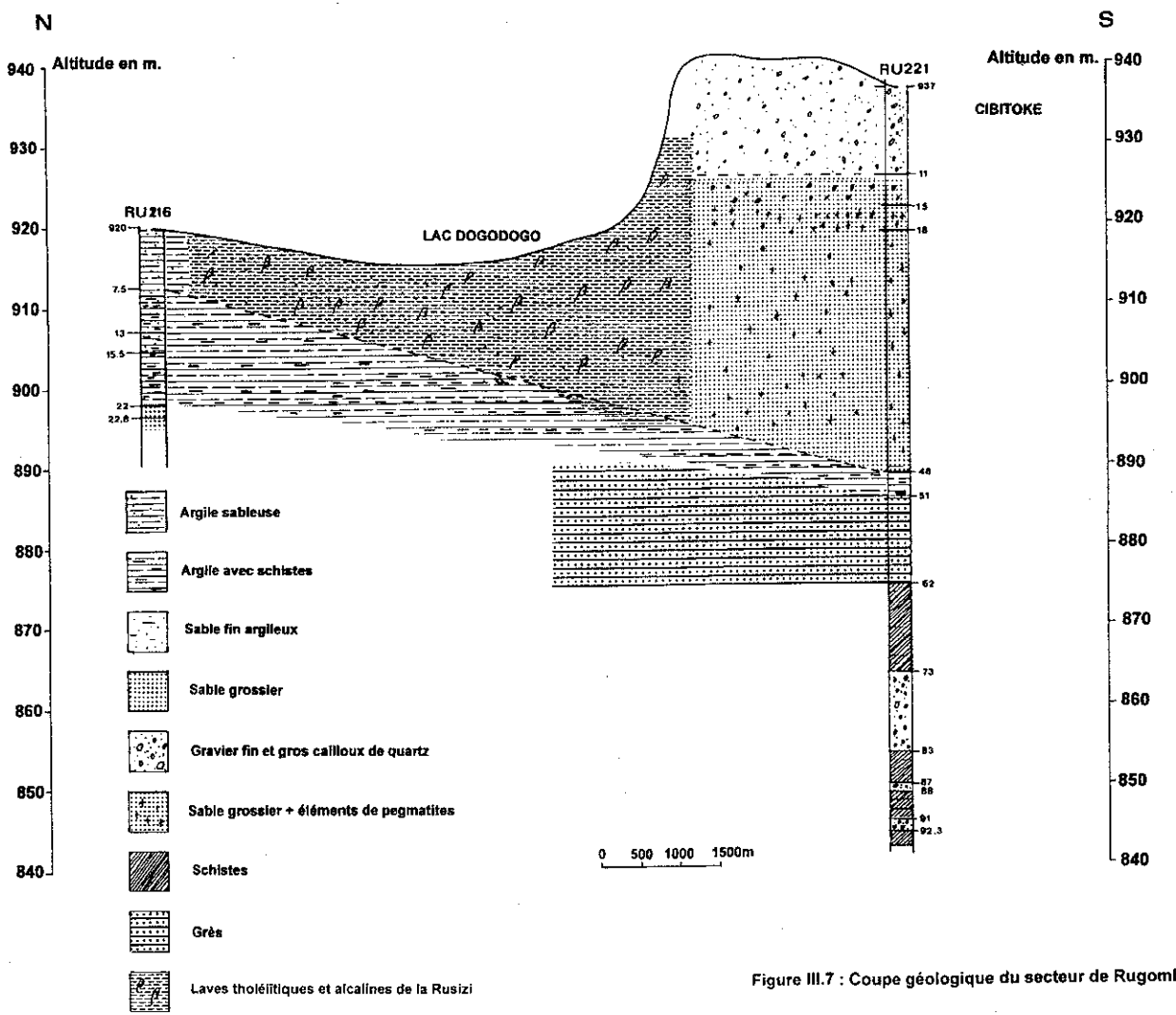


Figure III.7 : Coupe géologique du secteur de Rugombo - Cibitoke

Dans les alluvions de la Muhira, la géophysique a mis en évidence trois milieux bien distincts :

- une couche superficielle de haute résistivité correspondant à un matériel graveleux ;

- un milieu de faible résistivité correspondant un milieu argileux ;

- un milieu de haute résistivité correspondant aux roches de soubassement.

Sur la terrasse comprise entre la Muhira et la Nyamagana, on a constaté, à la suite de ces travaux de géophysique, une épaisseur de sédiments graveleux et sableux de 133 à 150 m d'épaisseur, recouvrant un matériel argileux.

La première couche de haute résistivité correspondrait à la couche sablo-graveleuse rencontrée dans le forage Ru 221 de Cibitoke. Son épaisseur augmente vers le Sud, passant de 48 à plus de 130 m. Cela implique que la profondeur à laquelle on rencontre les schistes tendres augmente considérablement vers le Sud.

C. Gasenyi-Ndava

Le secteur Gasenyi-Ndava est séparé du secteur de Cibitoke par l'éperon précambrien de Ruhagarika s'avançant jusqu'à la Rusizi. Dans la majorité de forages, on constate une discontinuité entre une formation supérieure constituée d'argile, sable, sable argileux avec des débris de schistes et, une formation inférieure comprenant principalement des schistes et des grès tendres à débris végétaux fréquents (Fig.III.8 et III.9).

A Gasenyi, les forages Ru 219 et Ru 231 ont été implantés à proximité de l'éperon de Ruhagarika. Ces deux forages ont atteint le soubassement.
Le forage Ru 219 s'est arrêté dans bedrock pegmatitique à 82 m de profondeur, soit à une altitude de 828 m. Le forage Ru 213, a atteint un bedrock granitique à 21 m, soit à une altitude de 904 m. Ces deux forages n'ont pas traversé la formation de schistes tendres.

On remarque que l'altitude du sommet bedrock est très différente dans les deux forages distants seulement de 400 m, ce qui laisse supposer une faille dans cette zone vraisemblablement liée à l'activité tectonique qui est à l'origine du graben du lac Tanganyika et des horsts qui l'entourent.

Les forages Ru 213, 220 et Ru 212 ont mis en évidence une couche superficielle de latérite grenailleuse. Dans tous les forages de Gasenyi, le formation supérieure est composée de l'argile, argile sableuse, de niveaux de gravier et de sable, d'argile sableuse contenant fréquemment des galets

roulés de quartz et des débris de schistes tendres du même type que celui de l'ensemble inférieur, de nodules calcareux et parfois de nodules limonitiques.

Entre 20 et 35 m de profondeur, le forage Ru 219 a mis en évidence un grès avec éléments quartzeux qui rappelle le grès traversé par le forage 221 de Cibitoke.

A Ndava, on remarque dans la formation supérieure argileuse des bancs épais de sable argileux, fin à grossier, contenant parfois de gros galets de quartz (Ru 223), des niveaux de graviers fins quartzeux. Les forages Ru 222 et Ru 223 n'ont pas atteint le niveau inférieur.

Aussi bien à Gasenyi qu'à Ndava, la formation inférieure est constituée de schistes tendres, gris, gris foncé , bruns, verdâtres, micacés, parfois sableux, à débris végétaux fréquents. Cette formation contient parfois des bancs de graviers fins quartzeux et de grès micacés passant par broyage à du sable fin micacé.

D. Kagunuzi

La région de Kagunuzi est située au Sud de Ndava ; elle a été investiguée par les forages Ru 227 et 228 (Fig.III.9). Ils ont traversé sur 30 m de profondeur une argile brun clair à grise, compacte, avec quartz, débris de pegmatites et nodules ferrifères et calcaires.

Dans le forage Ru 227, l'argile contient des débris de schistes tendres qu'on peut rapprocher à ceux rencontrés dans le secteur de Gasenyi-Ndava. En dessous, on remarque des bancs épais de sables fins argileux, parfois limoneux avec des niveaux graveleux. Dans ce secteur, la formation inférieure schisteuse n'a pas été atteinte.

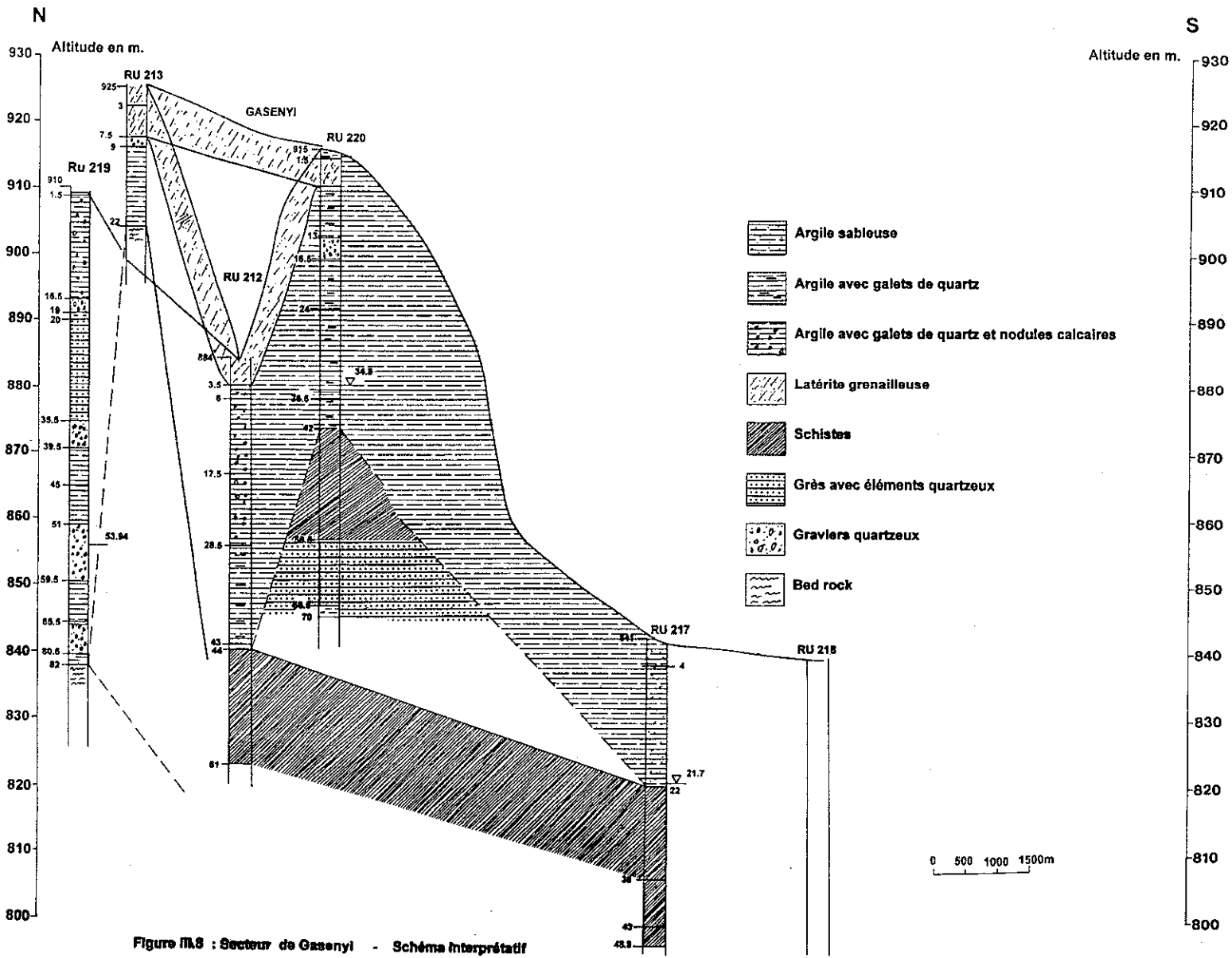


Figure III.8 : Secteur de Gasenyi - Schéma interprétatif

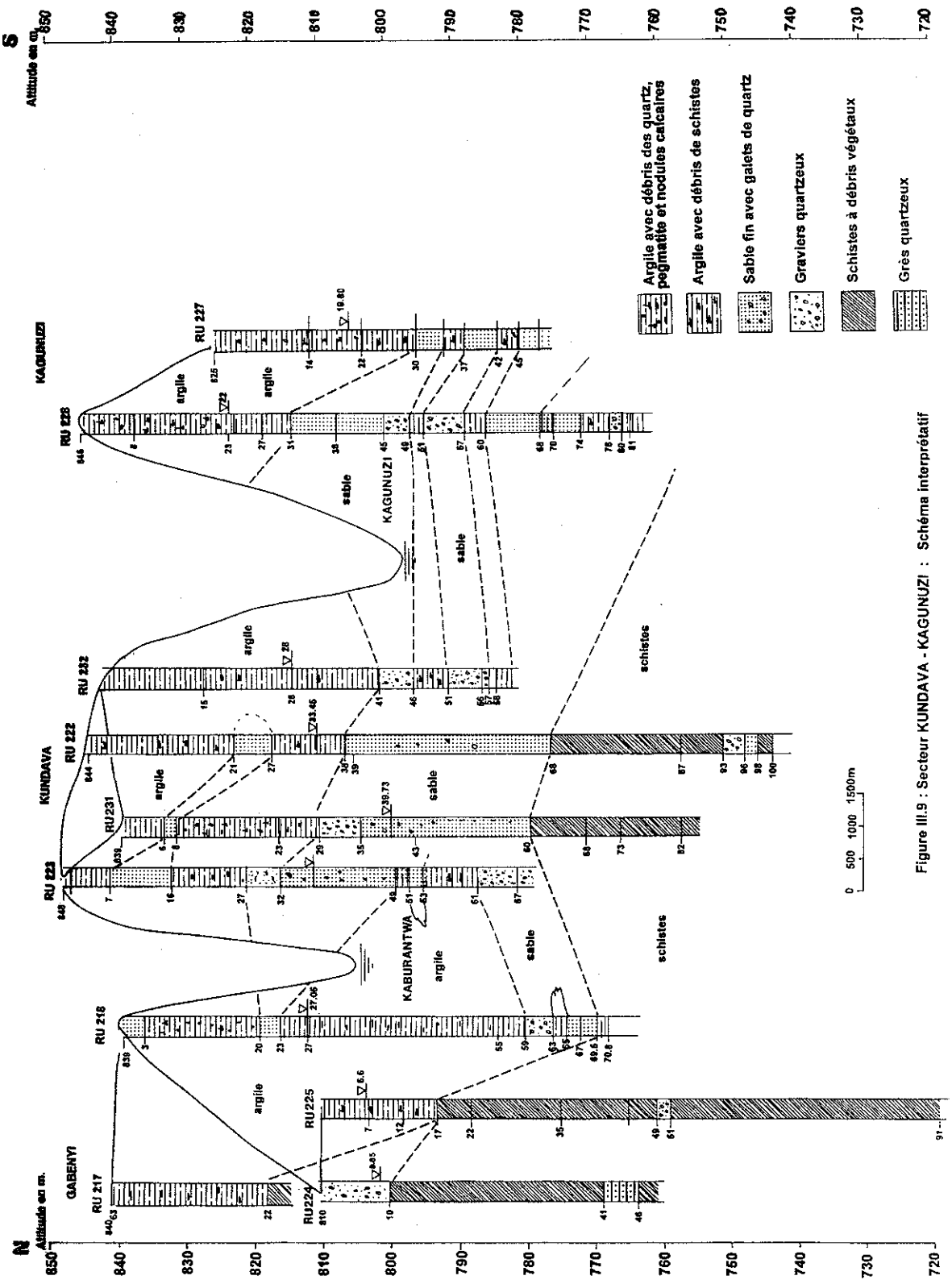


Figure III.9 : Secteur KUNDAVA - KAGUNUZI : Schéma interprétatif

III.3.1.5. Données hydrogéologiques

A Rukana, les forages Ru 245, 247, 250, 254 et 258 implantés dans la couverture basaltique n'ont pas atteint la nappe.

Des sources thermo-minérales auxquelles sont associées des dépôts de travertins sont repérées sur la rive gauche de la Ruhwa, à la frontière entre le Burundi et le Rwanda. Ces sources sont chaque fois localisées au voisinage des failles du Rift.

A Rugombo les forages Ru 216, 255, 256 et Ru 259 ont touché la nappe à des profondeurs variant entre 22 et 53.50 m. Le forage Ru 216 a donné un débit de 4 m^3/h dans un niveau de sables et graviers compris dans la formation de schiste tendre. Les débits obtenus dans les autres forages sont faibles : 612 l/h et 360 l/h respectivement aux forages Ru 256 et 259. Le débit très faible obtenu au forage Ru 255, n'a pas été mesuré.

A Cibitoke, le forage Ru 221 a touché la nappe à 35 m, dans un sable grossier hétérogène, induré, avec éléments de pegmatites et de grès. Ce niveau se situe au dessus des schistes tendres. Un essai de pompage à 4 m^3/h a provoqué un rabattement de plus de 15 m.

A Gasenyi, le forage Ru 213 a atteint le soubassement granitique à 21 m de profondeur sans avoir touché la nappe ni traversé la formation schisteuse. Le forage Ru 212, a été arrêté dans les schistes tendres à 61 m de profondeur, sans avoir atteint la nappe. Dans les autres forages, la nappe a été touchée dans une couche sableuse ou graveleuse, intercalée dans la formation schisteuse inférieure. Les essais de pompage dans les forages Ru 215, 217, 219 et 220 ont fourni des débits de 4 m^3/h. Les forages Ru 218, 224 et 225 situés dans la partie basse de ce secteur ont fourni des débits compris entre 0.54 et 1 m^3/h.

A Ndava, la nappe a été atteinte dans la formation inférieure sablo-gréseuse et schisteuse. Des débits de 4 m^3/h ont été obtenus dans les sondages Ru 222 et 223. Le sondage Ru 232 n'a fourni que 1 m^3/h, tandis que Ru 231 n'a donné qu'un débit très faible. Dans ce dernier forage, un dégagement gazeux a été observé à 64 m ; une analyse partielle de ce gaz a décelé la présence de CO_2 et l'absence d'hydrocarbures.

Les forages Ru 227 et 228 implantés à Kagunuzi ont touché la nappe à des profondeurs respectives de 30 et 38 m ; seul le forage Ru 227 a donné un débit de 4 m^3/h, tandis que Ru 228 n'a pas assuré un débit continu.

III.3.2. Plaine de la basse Rusizi

La plaine de la basse Rusizi descend graduellement vers le Sud, passant de 860 m à sa limite septentrionale à 774 m au niveau du lac. La plaine, mollement ondulée, est formée d'une succession de replats individualisés par le réseau hydrographique, par des ruptures de pentes ou par de simples inflexions de la pente. Sur ce relief, s'imprime un réseau hydrographique lâche dans la partie centrale, plus dense en bordure des contreforts rocheux.

III.3.2.1 Géomorphologie

D'Est en Ouest, la basse Rusizi est recouverte par les alluvions de la Rusizi, les formations lacustres et les alluvions des affluents de la Rusizi et du lac Tanganyika.

A. Alluvions de la Rusizi

La Rusizi forme une large plaine alluviale dans les formations lacustres anciennes. Elle y a développé des méandres, marais et îles sur une bande allant de 20 à 80 m de largeur. A hauteur de la limite septentrionale de la basse Rusizi, des falaises surplombent la plaine de 30-40 m. A mesure que l'on se rapproche du lac ou du delta de la Rusizi, les différences d'altitude entre les formations lacustres anciennes et fluviatiles récentes diminuent ; elles ne sont que de 2 à 3m au voisinage de la confluence Kajeke-Rusizi. De la Rusizi, en allant vers l'ouest ou vers l'Est, on peut observer :

- les alluvions actuelles, temporairement exondées, qui constituent des cordons discontinus et étroits, avec des formations marécageuses parsemées de petites mares et d'étangs (Germain et al. ; 1955) ;

- les alluvions récentes qui surplombent la Rusizi, de 4 à 10 m en période d'étiage. Les alluvions stratifiées sont, par endroits et périodiquement, influencées par les eaux salines de la Rusizi ;

- les alluvions anciennes qui couvrent les hautes terrasses situées au dessus 10 m du lit actuel de la Rusizi. Ces terrasses sont nettement individualisées et très larges (200-400 m) ou réduites à de simples inflexions dans la pente.

B. Formations lacustres

Les formations lacustres sont ceinturées par les alluvions fluviatiles de la Rusizi et de ses tributaires. Elles occupent la partie centrale de la plaine ; près du lac ; leur épaisseur serait de l'ordre de 1500 à 2000 m (Yzquierdo, 1960).

C. Alluvions des tributaires

Les rivières qui traversent la basse plaine se sont surimposées aux formations lacustres. A l'entrée dans la plaine, les rivières déposent progressivement des matériaux charriés à partir de la crête et des contreforts. Des dépôts alluviaux actuels épais recouvrent une grande partie de la plaine de la basse Rusizi.

En convergeant à partir des contreforts vers la Rusizi, on traverse successivement les dépôts de piedmont, les alluvions actuelles des tributaires de la Rusizi ou du lac Tanganyika, les alluvions lacustres et les alluvions de la Rusizi. Toutes ces alluvions sont constituées de sables fins à moyens, sables graveleux, argiles, argiles sableuses accompagnés fréquemment de concrétions carbonatées.

III.3.2.2. Stratigraphie

Dans la plaine de la basse Rusizi, on distingue:

- l'Holocène (Ho) qui est formé principalement de dépôts de cônes alluviaux, développés au piedmont d'escarpements, de dépôts dus au ruissellement d'épandage, d'alluvions récentes de la Rusizi et de son delta et les plages du lac Tanganyika, comportant des cordons littoraux ;

- le Pléistocène moyen (Pm) qui comporte principalement des formations fluvio-lacustres allant de sables grossiers aux dépôts fins silto-argileux.

III.3.2.3. Sédimentologie

En 1985, Chorowicz & Thouin ont proposé une ébauche sédimentologique et tectonique de la basse plaine de la Rusizi (Fig.III.10). Six faciès ont été répertoriés :

- les dépôts lacustres : il s'agit de sables fins à moyens , de composition minéralogique constante : quartz, feldspaths, muscovite et minéraux noirs. Ils sont limités par de petits escarpements ou de ruptures de pentes à regards opposés, oriental vers l'Est, occidental vers l'Ouest. Cet ensemble est situé entre les dépôts fluviatiles liés au cours de la Rusizi et des rivières Mpanda et Kajeke ;

- un faciès de barrières littorales constitué de sables hétérométriques gris (quartz, feldspaths, peu de micas, sans minéraux noirs), liés à l'action conjuguée des courants lacustres, des vagues et du vent. Il se superpose localement aux formations lacustres ;

- des dépôts fluviatiles à dominante silto-argileuse, localisés le long de la Rusizi et de son delta. Vers l'est, ils se mélangent avec des sédiments lacustres, lesquels sont partiellement repris par les rivières ;

- des dépôts fluviatiles à dominante argileuse qui se développent au nord-est et à l'est de la plaine, dans des dépressions à fond plat, limitées sur la bordure occidentale par des talus contrôlant la direction des rivières ;

- des faciès lacustres et fluviatiles indifférenciés qui sont localisés entre les dépôts fluviatiles et les dépôts lacustres ;

- un faciès de cône alluvial, reconnaissable sur la bordure orientale de la plaine.

Du point de vue tectonique, on observe de petits escarpements, talus et ruptures de pentes à regard vers l'Est ou vers l'Ouest, délimitant les ensembles sédimentaires.

Les auteurs cités ci-dessus décrivent ces ruptures comme des failles à faible rejet, affectant des formations superficielles sableuses et argileuses. La faille la plus orientale, passant à l'intérieur de la ville de Bujumbura, se situe entre les sédiments récents et le Précambrien. Les accidents situés au centre de la plaine et qui affectent les Paléo-barrières littorales, paraissent un peu plus anciens que les autres car certains d'entre eux, situés au Sud, sont recouverts par de dépôts fluviatiles. Les failles visibles dans les alluvions actuelles de la Rusizi sont les plus récentes.

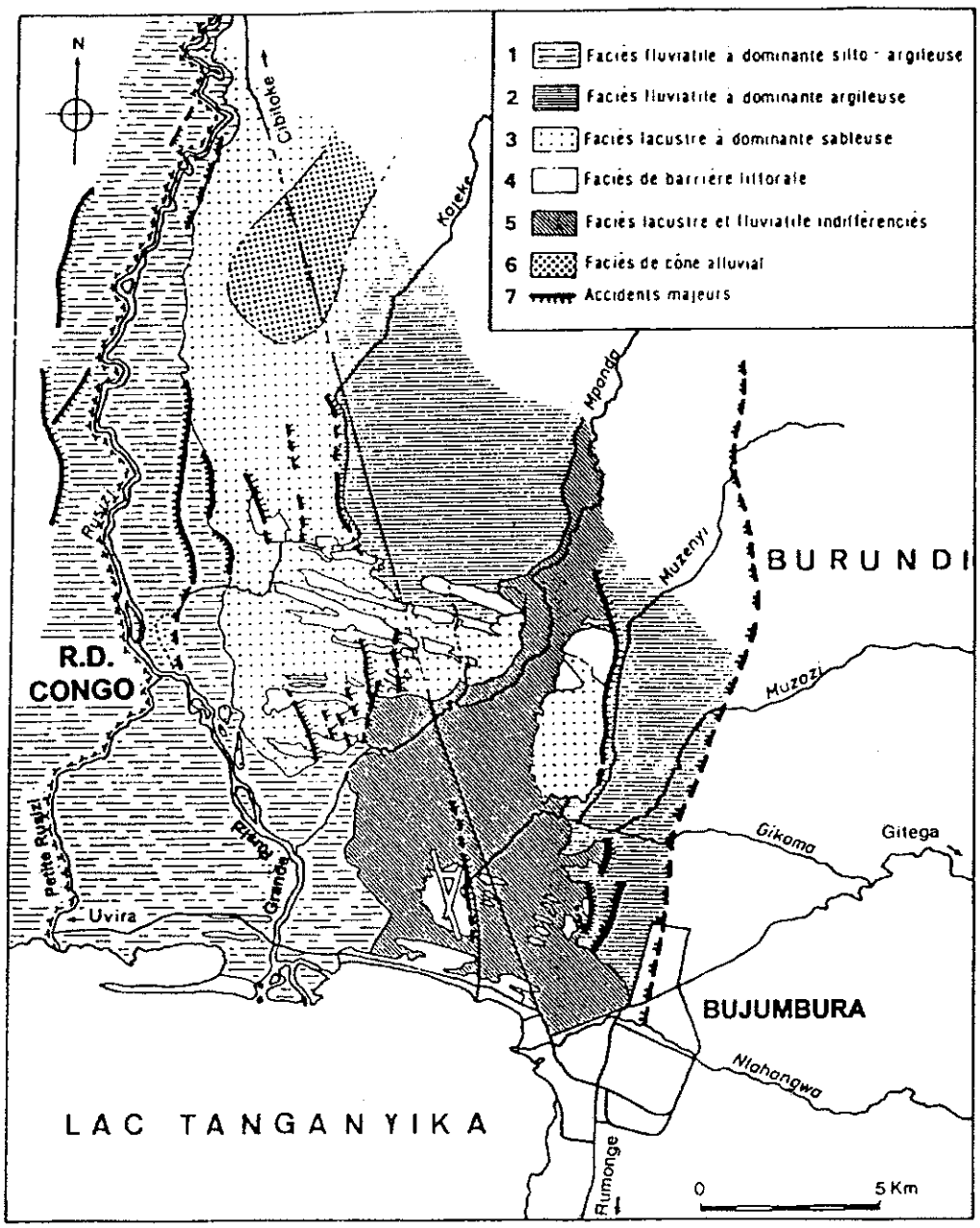


Figure III.10 : EBAUCHE SEDIMENTOLOGIQUE ET TECTONIQUE DE LA PLAINE DE LA BASSE RUSIZI (Chorowicz et Thouin, 1985)

III.3.2.4. Données géologiques et hydrogéologiques

Dans la basse Rusizi (coté burundais), les forages ont été implantés le long des pistes transversales distantes les unes des autres de 1260 m et traversant d'Est en Ouest la plaine. Sur chaque transversale, la distance entre deux forages successifs est de plus ou moins 2000 m (Fig.III.11).

Malgré l'abondance et la proximité des sondages, Waleffe (1985) a souligné l'impossibilité d'établir une corrélation entre les différents terrains rencontrés sur base de la lithologie.

A partir des forages implantés le long des transversales (de T1 à T17), nous avons réalisé dans la direction Est-Ouest, des coupes géologiques traversant les différents dépôts identifiés dans cette partie de la plaine . Ces coupes, montrant la nature et la variation en profondeur des différentes couches traversées par les forages, ont permis de mieux comprendre la géométrie de l'aquifère. Par des schémas interprétatifs regroupant les forages, nous avons dégagé un vue tridimensionnelle d'ensemble de la basse plaine.

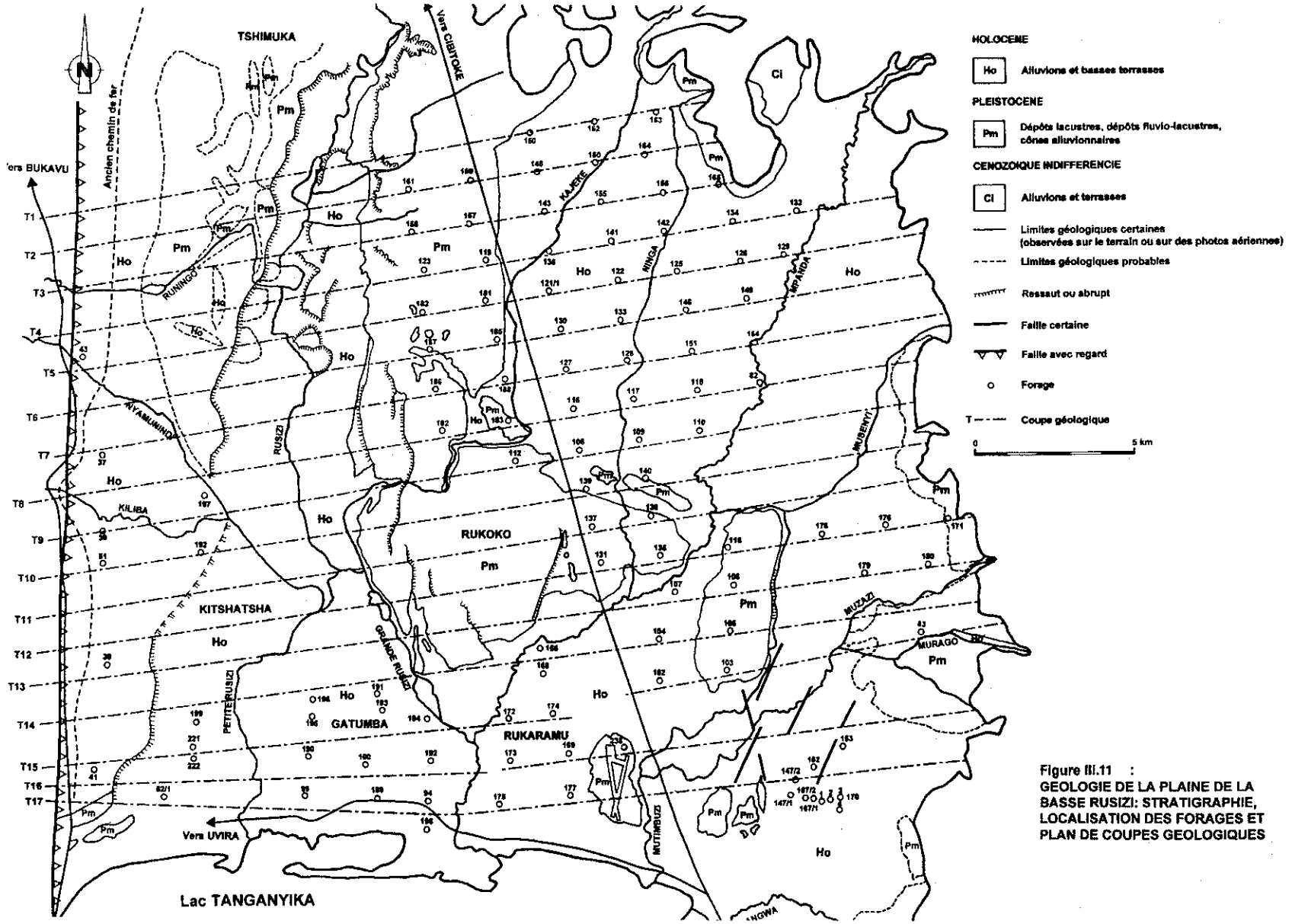


Figure III.11 : GEOLOGIE DE LA PLAINE DE LA BASSE RUSIZI: STRATIGRAPHIE, LOCALISATION DES FORAGES ET PLAN DE COUPES GEOLOGIQUES

Coupe géologique T1

La coupe topographique tracée montre à partir de la rivière Rusizi des escarpements, marqués par des ressauts de relief, avec un dénivelé total de plus de 75 m entre la Rusizi (785m) et le seuil de Gihungwe (Fig. III.12).

Les forages Ru 150, 162 et 163 ont été implantés dans les dépôts fluviatiles ; ils ont traversé une couche argilo-sableuse parfois graveleuse, calcareuse, de couleur grise, devenant gris jaunâtre en profondeur. A l'extrémité de la plaine, l'épaisseur de cette couche est de 20 m (Ru 163) et atteint 47 m au forage Ru 162 ; elle constitue le sommet de l'aquifère.

En dessous, on trouve une couche sablo-graveleuse, dont l'épaisseur est comprise entre 2 et 7 m. Les trois forages ont été arrêtés à la base de la couche, dans une argile sableuse à sablo graveleuse sans calcaire qui constitue la base de l'aquifère.

Le niveau d'eau, recoupé dans la couche sablo-graveleuse, est remonté de quelques mètres pour se stabiliser dans la couche sablo-argileuse.

Le tableau 3.1 reprend les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T1.

Tableau 3.1

Forage T1	Cote (m)	Profondeur (m)	Sommet aquifère(m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 150	848.7	38	36	38	2	29.15	6.85
Ru 162	861	48.75	47	48.75	1.75	31	14.6
Ru 163	862.4	29	20	27	7	10	7

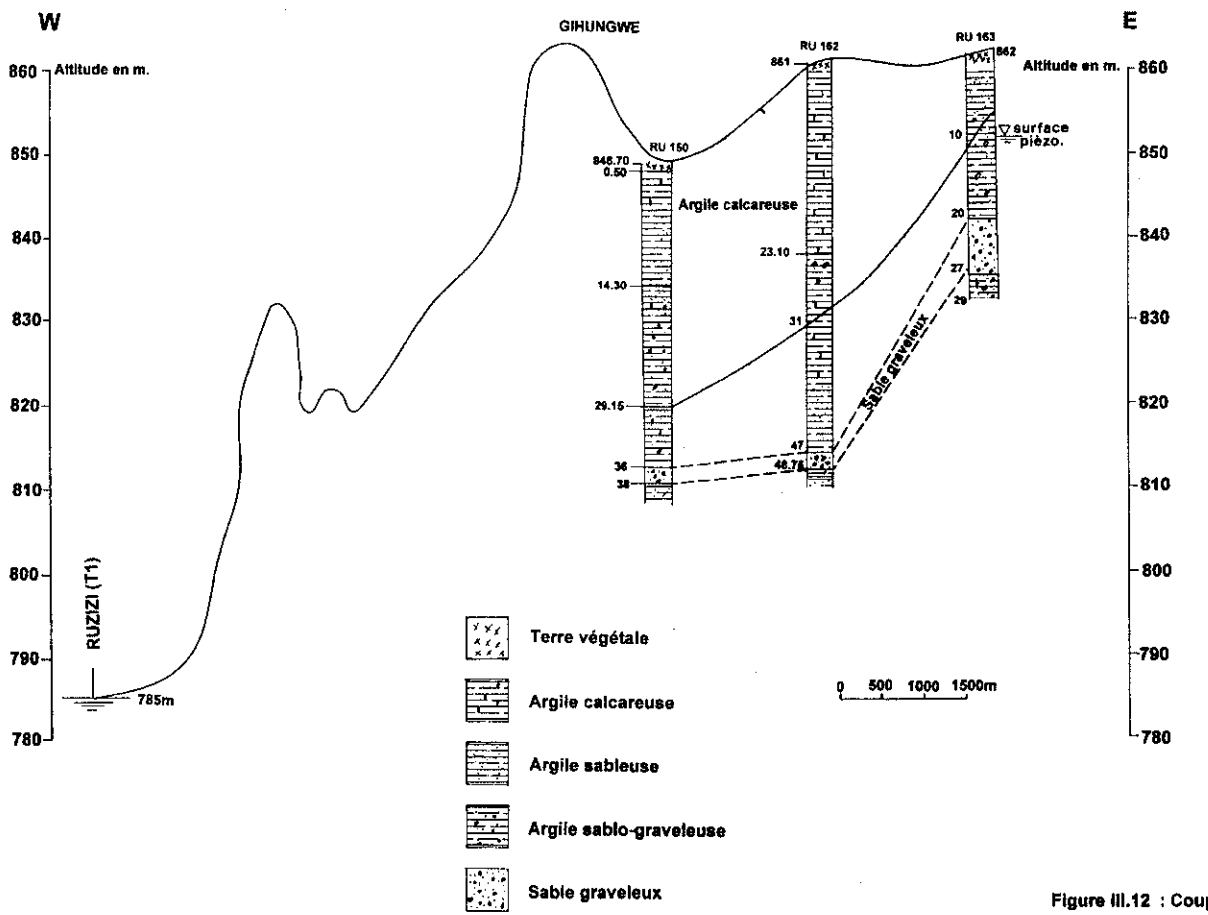


Figure III.12 : Coupe géologique T1

Coupe géologique T2

Cinq forages ont été implantés le long de cette transversale (Fig.III.13). D'ouest en est, ce sont : Ru 161, Ru 159, Ru 148, Ru 160/2 et Ru 164. Les deux premiers forages sont localisés dans les dépôts fluvio-lacustres, les trois derniers dans les dépôts fluviatiles des affluents de la rivière Rusizi.

Entre les forages Ru 161 et Ru 159, la coupe géologique montre une alternance de sables fins silto-argileux et d'argiles silto-sableuses. Vers l'Est, le sable fin silteux disparaît progressivement ; la couche d'argile silto-sableuse entre en contact avec une couche d'argile sableuse à sablo-graveleuse, calcareuse, de couleur gris jaunâtre. Cette couche s'observe jusqu'à l'extrémité de la plaine. Elle présente en son sein des intercalations de graviers ou de sables graveleux avec parfois des cailloux de quartz. Les forages Ru 148, 160/2 et Ru 162 ont été arrêtés à la base des sables, dans une couche ayant la même lithologie que la sus-jacente.

La nappe a été recoupée à plus de 30 m de profondeur, dans des niveaux présentant une lithologie très variable : sable graveleux (Ru 161), sable fin silto-argileux (Ru 159), et du sable graveleux pour les forages percés dans les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi.

Le sommet et la base de la nappe sont une argile sableuse à sablo-graveleuse, devenant silteuse à l'Ouest.

A l'exception du forage Ru 159, le niveau d'eau est remonté de quelques mètres , la surface piézométrique se situant toujours dans la couche argilo-sableuse.

L'épaisseur de l'aquifère est variable, comprise entre 2 et 4 m dans les dépôts sablo-graveleux de l'Est et augmentant sensiblement dans les dépôts fluvio-lacustres. Le tableau 3.2 montre les paramètres de l'aquifère le long de la coupe T2

Tableau 3.2

Forage	Cote	Prof. totale	Sommet	Base	Epaisseur	Niveau	Remontée
T2	(m)	(m)	aquifère(m)	aquifère(m)	aquifère (m)	piézo (m)	(m)
Ru 161	827.15	75.50	31	38	7	25.27	5.73
Ru 159	843.65	52.60	38	52.65	14.65	37.8	0.2
Ru 148	841.60	36	34	36	2	25.44	8.56
Ru 160	854.45	38.5	35	38.5	3.5	27.35	7.56
Ru 164	850.10	34.50	32	34.5	2 .5	18.4	11.8

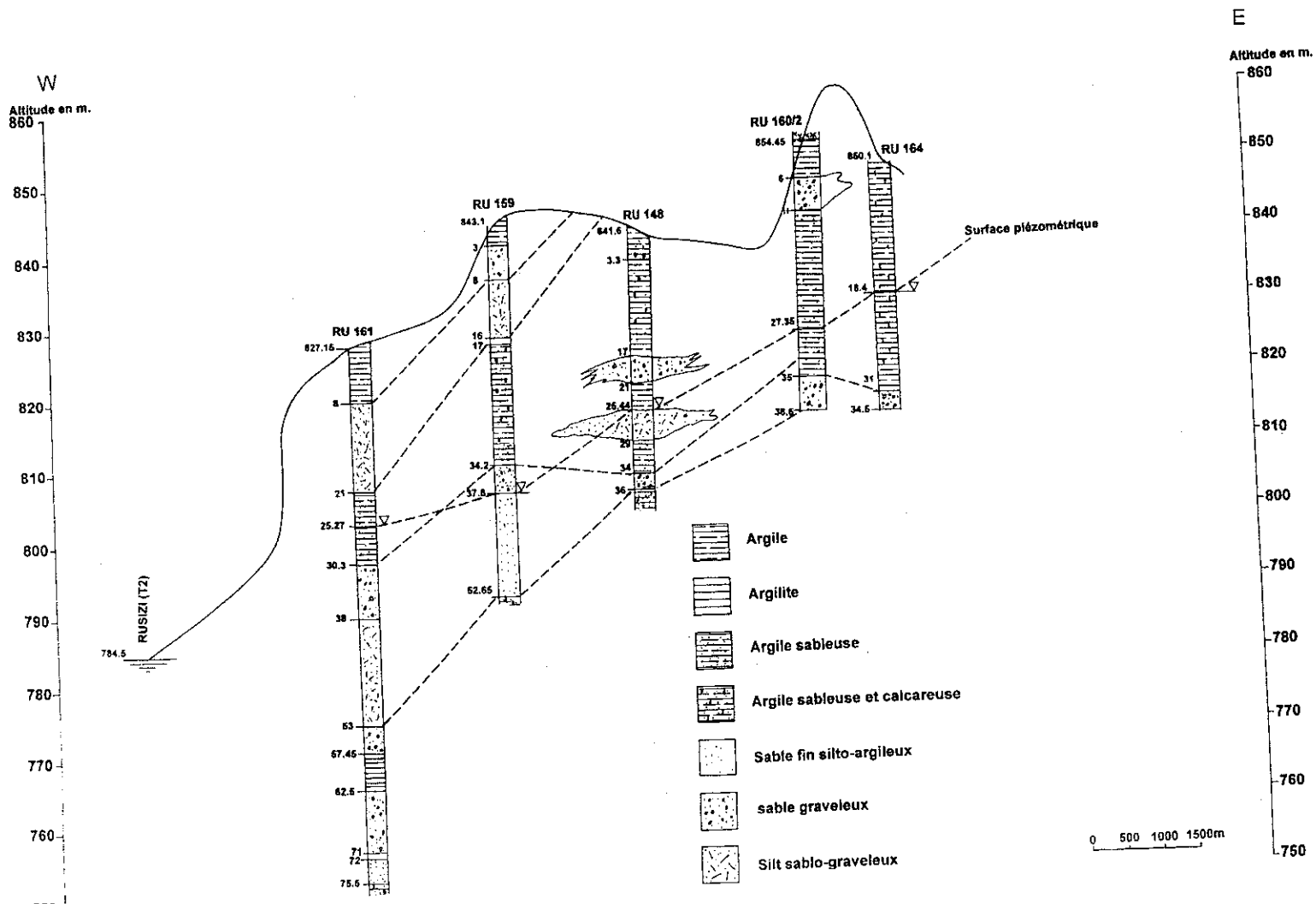


Figure III.13 : Coupe géologique T2

Coupe géologique T3

Cinq forages ont été implantés le long de la transversale T3 (Fig.III.14) ; d'Ouest en Est, ce sont : Ru 158, 157,143,155,156 et Ru 165.

A l'Ouest, la coupe montre une argile très sableuse qui repose sur un silt grossier sableux (Ru 158). Celui-ci surmonte à son tour une couche épaisse d'argile silto-sableuse, légèrement calcareuse, contenant vers la base des niveaux de sable quartzeux.

Entre Ru 158 et 157, la couche d'argile est en contact avec du sable fin argileux, présentant à la base du sable blanc feldspathique.

Au milieu de la coupe, entre Ru 157 et 143, le sable fin fait place à un sable moyen à grossier, très épais, montrant en profondeur une passe de silt grossier. Le forage Ru 143 a été arrêté dans un sable grossier ; la base de ce sable n'est donc pas connue.

Vers l'Est, ce sable est limité par une couche d'argile sableuse à sablo-graveleuse, calcareuse dont l'épaisseur peut dépasser 30 m. Cette couche présente en profondeur des niveaux de sables graveleux. A l'extrémité de la coupe, le forage Ru 165 a été arrêté dans une arène de gneiss à biotite qui rappelle les roches précambriennes du bassin supérieur.

D'Ouest en Est, la coupe T3 met en évidence un faciès fluviatile à dominante silto-argileuse représentant les dépôts fluviatiles anciens de la Rusizi avec une alternance de sable de différentes granulométries faisant partie des dépôts lacustres au milieu de la plaine et une couche d'argile sableuse à sablo-graveleuse, calcareuse, qui est un faciès fluviatile des affluents de la Rusizi.

Dans tous les forages de la coupe, la nappe été touchée dans une couche de sable grossier à graveleux, situé entre 30 et 34 m de profondeur. Il y a eu une remontée du niveau de l'eau dans tous les forages, à l'exception du forage Ru 143.

La nature lithologique du sommet et de la base de l'aquifère est variable : à l'Est, l'aquifère est cantonné dans des dépôts argileux silto-sableux, au milieu (Ru 143), le sommet a une même nature que l'aquifère, qui repose sur un silt grossier non argileux. Vers l'Est, l'aquifère est confiné dans les dépôts argileux et à l'extrémité, la base de l'aquifère est un soubassement dont la géologie est celle des bassins supérieurs.

Le tableau 3.3 montre les principaux paramètres de l'aquifère le long de la transversale T3.

Tableau 3.3

Forage T3	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 158	827.75	37	33	34	1	26.4	6.6
Ru 157	838.35	46	36.07	44	7.93	30.05	4.95
Ru 143	834.25	38.27	22.13	31	8.87	22.13	0
Ru 155	843.55	39.95	30	34	4	26.3	2.8
Ru 156	841.65	41	30	34	4	17.35	12.65
Ru 165	846.25	31.8	29.10	31.80	1.9	17.70	10.3

Sur la carte géologique, les forages Ru 158 et 157 se trouvent dans les dépôts lacustres et pourtant, les logs lithologiques de ces deux forages sont très différents.

En effet, le forage Ru158 a traversé une argile silto-sableuse pratiquement sur toute la profondeur ; la nappe a été captée dans une passe sableuse d'un mètre d'épaisseur. Ce forage se trouve dans un faciès fluviatile à dominante argileuse qui fait partie des alluvions de la Rusizi.

Le forage Ru 143 a traversé une alternance de sable fin, moyen et grossier, avec une intercalation silteuse entre 31 et 36 m de profondeur. Il a été arrêté dans un sable graveleux et argileux. Ce forage se situe dans les dépôts lacustres.

Nous proposons donc une légère modification des limites entre d'une part les dépôts fluviatiles de la Rusizi et les dépôts lacustres et d'autre part, entre ces derniers et les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi.

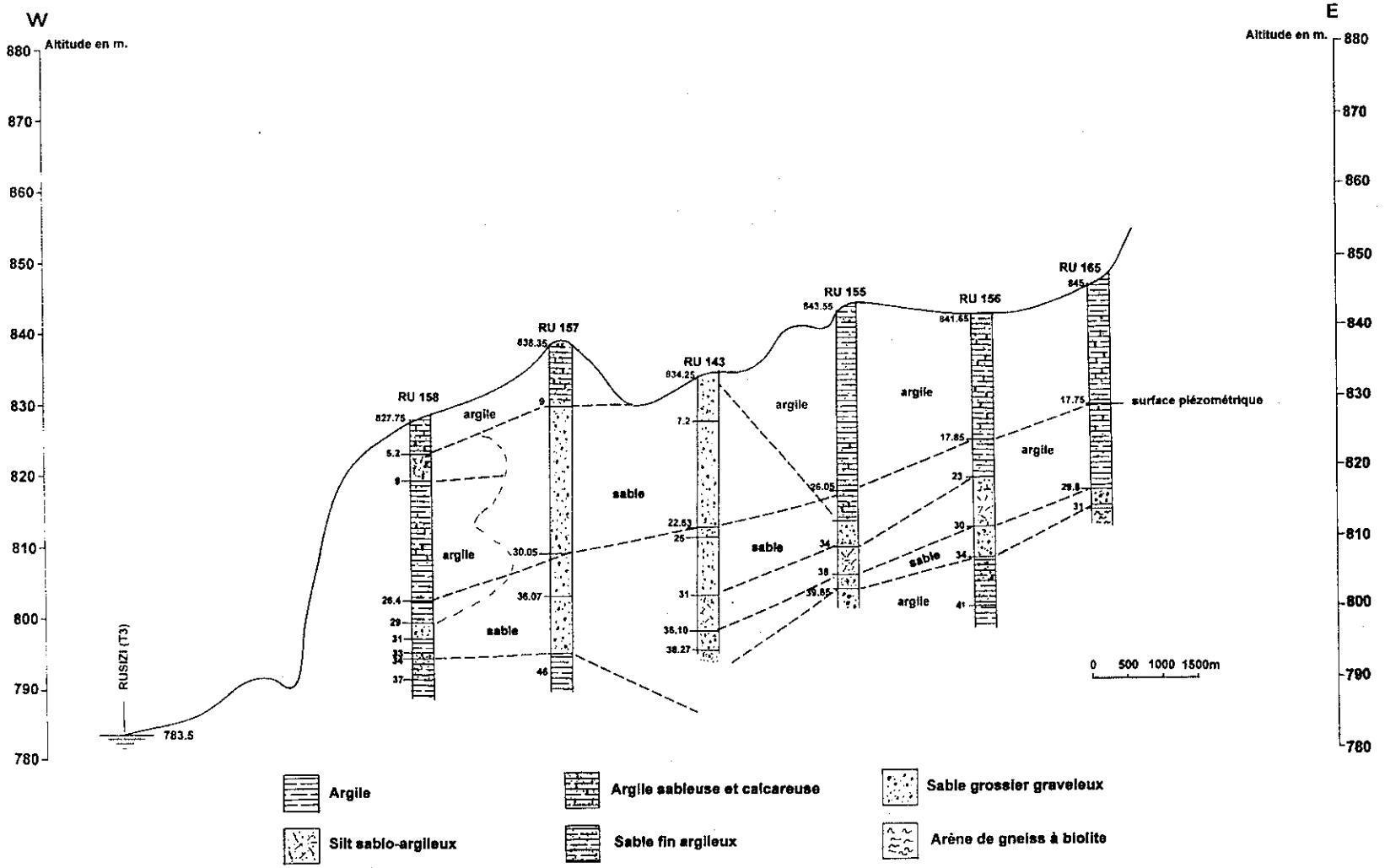


Figure III.14 : Coupe géologique T3

Coupe géologique T4

Sept forages ont été implantés le long de la transversale T4. D'Ouest en Est, ce sont : Ru 123, 119,136,141,142,134 et 132 (Fig.III.15).

De haut en bas, la coupe T4 montre une première couche constituée d'argile sableuse, parfois sablo-graveleuse, calcareuse et micacée, renfermant des grains de travertin entre les forages Ru 136 et 141. Vers l'Est, des niveaux de sable sont intercalés au sein de cette couche. L'épaisseur maximale de cette argile est observée au milieu de la coupe où elle atteint 24 m. Cette couche constitue le toit de l'aquifère.

L'aquifère est formé de sables de granulométrie et épaisseur variables : à l'Ouest, on observe une couche épaisse de sable fin argileux avec des niveaux de sable moyen à grossier dont l'épaisseur atteint 30 m au forage Ru 123 ; elle diminue progressivement vers l'Est, avec un changement de la granulométrie. Entre Ru136 et 141, on passe du sable fin à un sable moyen à grossier ; l'épaisseur de ce sable diminue sensiblement pour atteindre 1,70 m au forage Ru 134. A l'extrémité de la plaine, ce sable entre en contact avec un mélange de sable grossier et de gravier quartzeux feldspathique, résultant du colluvium des contreforts de la plaine.

Tous les forages ont été arrêtés à la base de la couche sableuse, dans une argile grise sableuse, parfois calcareuse et micacée.

La nappe a été touchée dans la couche sableuse, à des profondeurs variables, la plus faible profondeur se situant à l'Est, au forage Ru 132. Une remontée du niveau de l'eau a été constatée dans tous les forages.

Le tableau 3.4 donne les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T4 .

Tableau 3.4

Forage T4	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 123	827.50	49.45	17	48	31	30	3
Ru 119	828.50	38.66	18	33.10	13.1	25.50	4.5
Ru 136	828.80	35.68	23.15	35.65	12.5	17.50	6.5
Ru 141	833.35	31.00	24	30	6	20.10	3.9
Ru 142	832.60	21.00	16	21	2	10.34	8.66
Ru 134	842.10	32.00	27	28.7	1.7	19.83	7.17
Ru 132	837.00	14.37	9	13.50	4.5	5.63	3.37

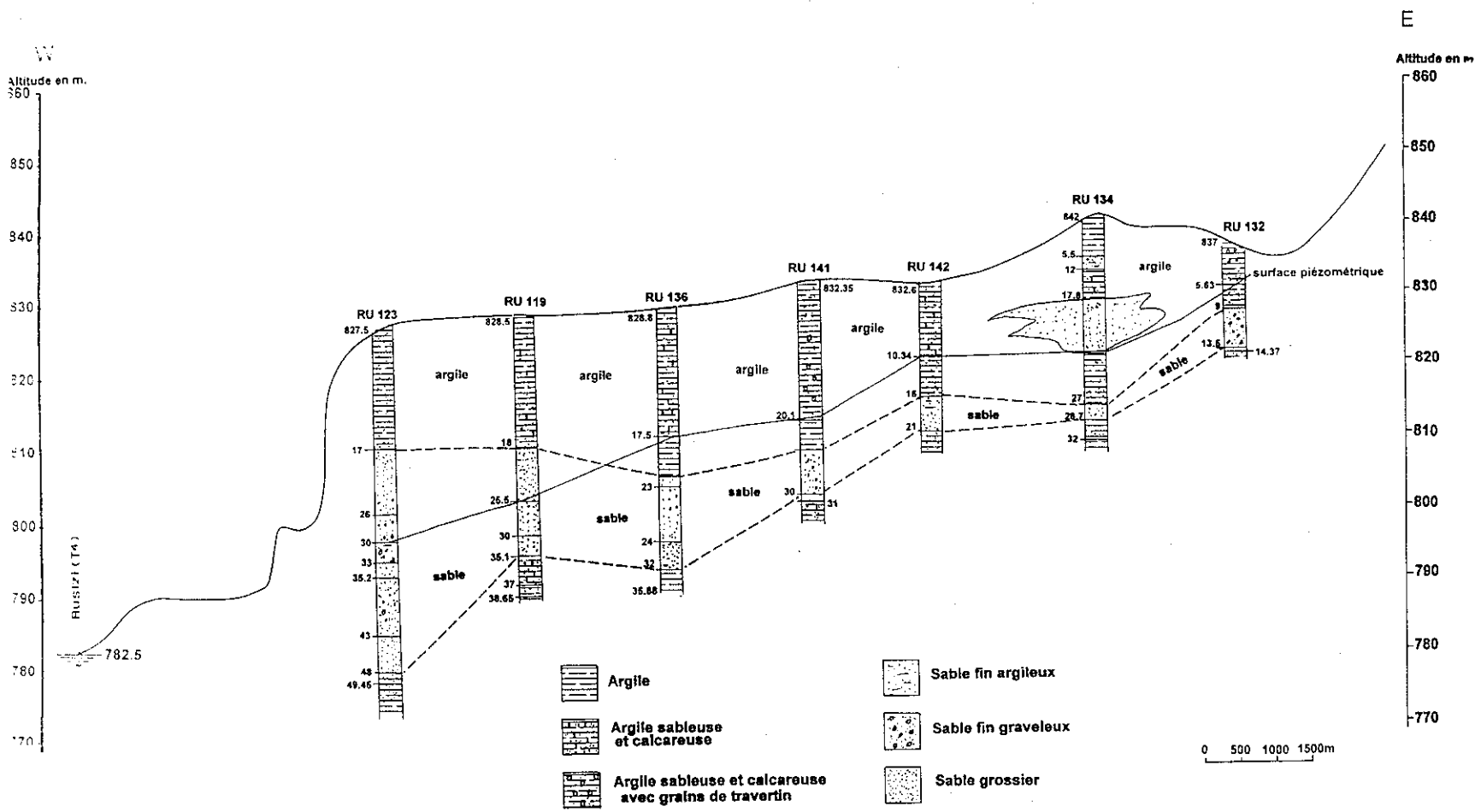


Figure III.15 : Coupe géologique T4

Coupe géologique T5

Nous ne disposons pas de description géologique de forages Ru 181 et 182 situés dans les dépôts lacustres situés à l'Ouest (Fig.III.16) .

La coupe géologique T5 montre une première couche argileuse, calcareuse et micacée, renfermant du travertin calcaire entre les forages Ru 121/1 et 125. Elle représente le sommet de l'aquifère ; son épaisseur varie entre 19.4 et 27.46 m. Entre les forages Ru 125 et 129, la couche montre des passes sablo-graveleuses.

Au voisinage de dépôts fluvio-lacustres, l'aquifère est un sable fin d'épaisseur avoisinant 10 m ; au milieu de la coupe, c'est un sable grossier passant à un gravier fin roulé au forage à l'est. Son épaisseur est très réduite (moins d'un 1 m aux forages Ru 122 et 125). Le forage Ru 121/1, profond de 53.10 m, a traversé la nappe dans deux niveaux aquifères, entre 25 et 34 m et entre 51,40 et 53,10 m.

La base de l'aquifère est une argile sableuse gris jaunâtre micacée et calcareuse.

Le tableau 3.5 reprend les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T5. Sauf au forage Ru 121, le niveau piézométrique s'est stabilisé ailleurs dans le toit de l'aquifère.

Tableau 3.5

Forage T5	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 182	823.00	48.00	33.50			31.71	1.79
Ru 181	822.00	44	32			22	10
Ru 121/1	825.00	53.10	25	34	9	22.23	0
Ru 122	827.00	25.10	23	23.52	0.52	16.62	6.38
Ru 125	830.35	21.40	21	21.40	0.40	16.50	4.50
Ru 126	836.30	29	27.46	29	1.54	20.30	7.7
Ru 129	833.00	20.85	19.40	20.85	1.45	8.95	10.45

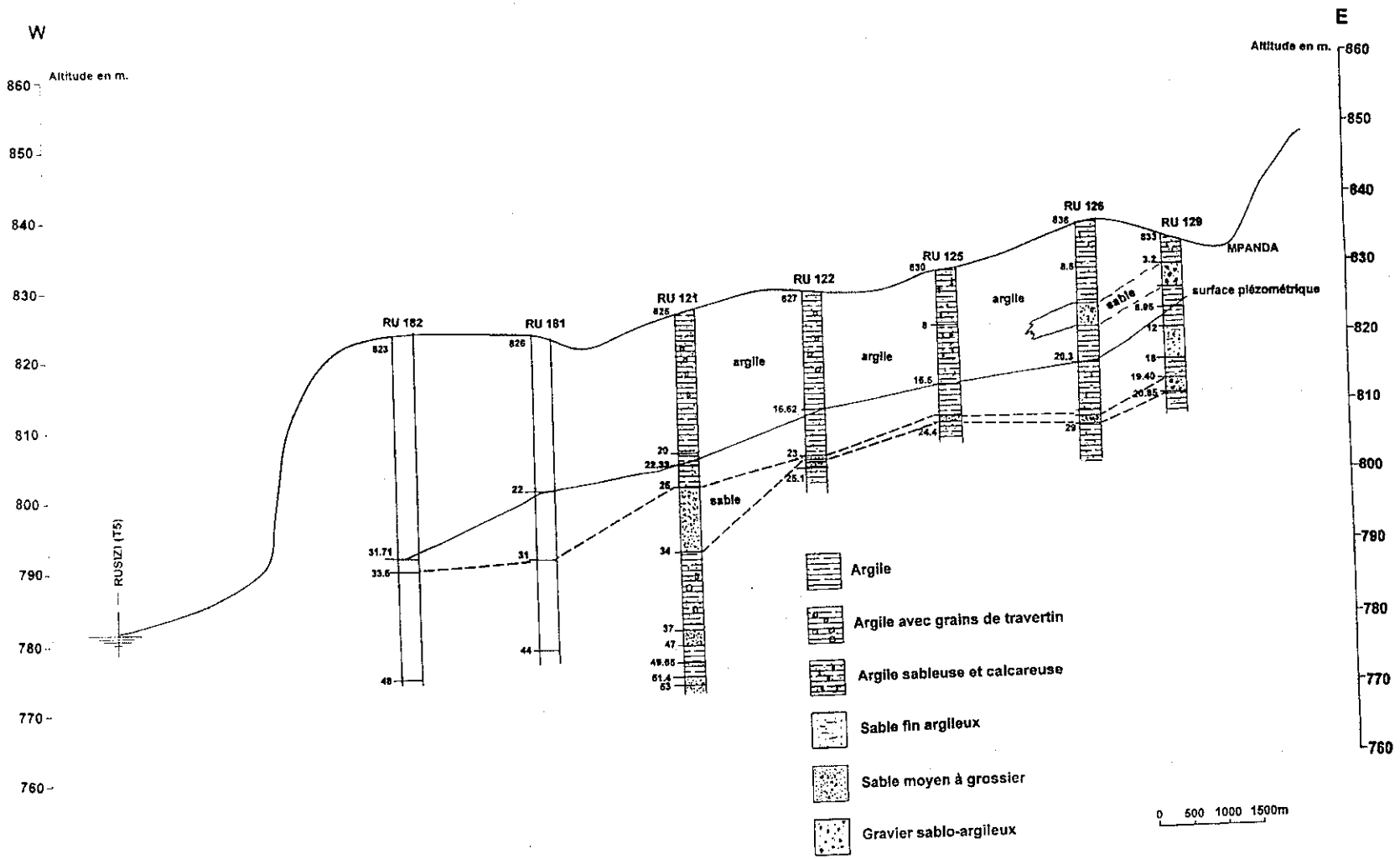


Figure III.16 : Coupe géologique T5

Coupe géologique T6

Six forages ont été implantés le long de la transversale T6 (Fig.III.17). Pour les forages Ru 187 et 185 la description lithologique manque. Tous les autres forages sont localisés dans les dépôts fluviatiles.

D'Ouest en Est, la coupe montre de haut en bas une argile sableuse grise, calcareuse et micacée, épaisse de plus de 20 m au forage Ru 130, et qui forme le toit de l'aquifère. L'épaisseur diminue vers l'est, n'atteignant plus que 7 m au forage Ru 146. Au forage Ru 149, des passes de sable graveleux sont observées dans cette argile.

L'aquifère est formé par un sable grossier, légèrement argileux, renfermant parfois du gravier fin, du mica et de la tourmaline. A l'Est, des passes de d'argile sableuse sont observées au sein de cette couche.
La base de l'aquifère est une argile jaune, sableuse à silto-sableuse, calcareuse et micacée.

Le tableau 3.6 présente les paramètres de l'aquifère au niveau de la transversale T6.

Tableau 3.6

Forage T6	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 187	809.00	36	32.50			14.90	17.6
Ru 185	815.00	45.50	24			20.06	3.94
Ru 130	816.80	34.80	18.30	34.80	16.5	14.40	5.9
Ru 133	819.70	20	15	20	5	11.35	3.65
Ru 146	823.90	29.52	25	29.52	4.52	13.50	11.50
Ru 149	831.65	38.75	32.10	38.75	6.56	23.35	5.65

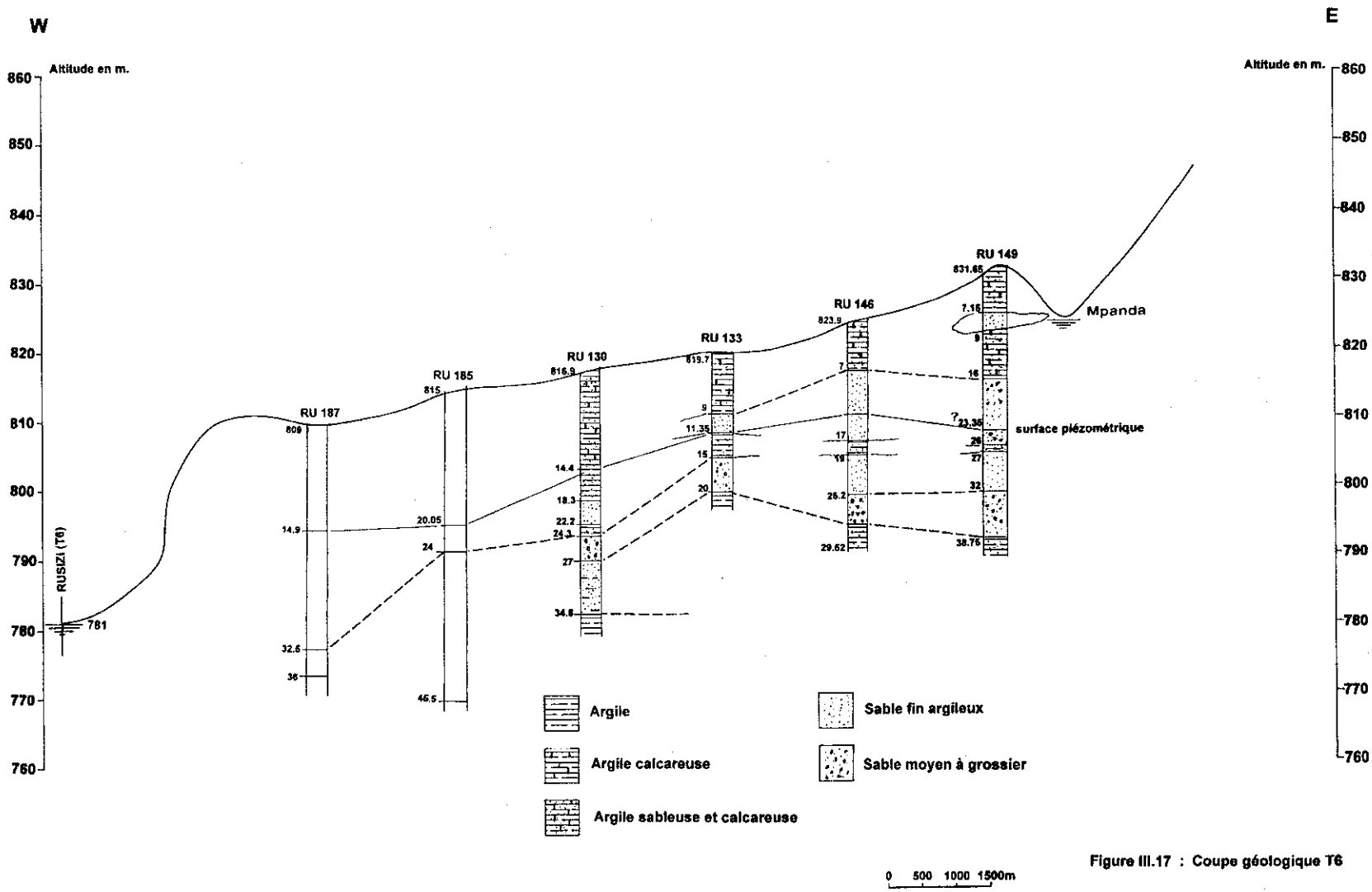


Figure III.17 : Coupe géologique T6

Coupe géologique T 7

Le long de la transversale T7 (Fig.III.18), la coupe géologique montre de haut en bas une couche d'argile sableuse gris noir à gris verdâtre, calcareuse et micacée. Cette couche représente le sommet de l'aquifère. Son épaisseur atteint 25 m à l'Ouest et diminue progressivement vers l'Est.

En dessous, on trouve une couche de sable fin argileux au voisinage de dépôts fluvio-lacustres (Ru 127), passant progressivement à un sable moyen à grossier, devenant graveleux et feldspathique à l'Est ; elle présente localement un banc de silt sablo-argileux .

La base de l'aquifère est formée d'une argile jaunâtre, sableuse à sablo-silteuse. Comme on peut l'observer, à l'Est, la coupe T7 affiche pratiquement la même lithologie que la coupe T6.

Le tableau 3.7 présente les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T7.

Tableau 3.7

Forage T7	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 186	815.00	52.50	28			25.95	2.05
Ru 188	811.00	26.50	23			18.11	8.1
Ru 127	811.10	38.20	25.20	34.20	9	16.10	9.10
Ru 128	813.55	19.20	15.20	19.20	4	9.20	6
Ru 151	823.80	37.50	25	37.50	12.5	16	9
Ru 154	825.62	39.10	19	28.15	9.5	14.77	4.23

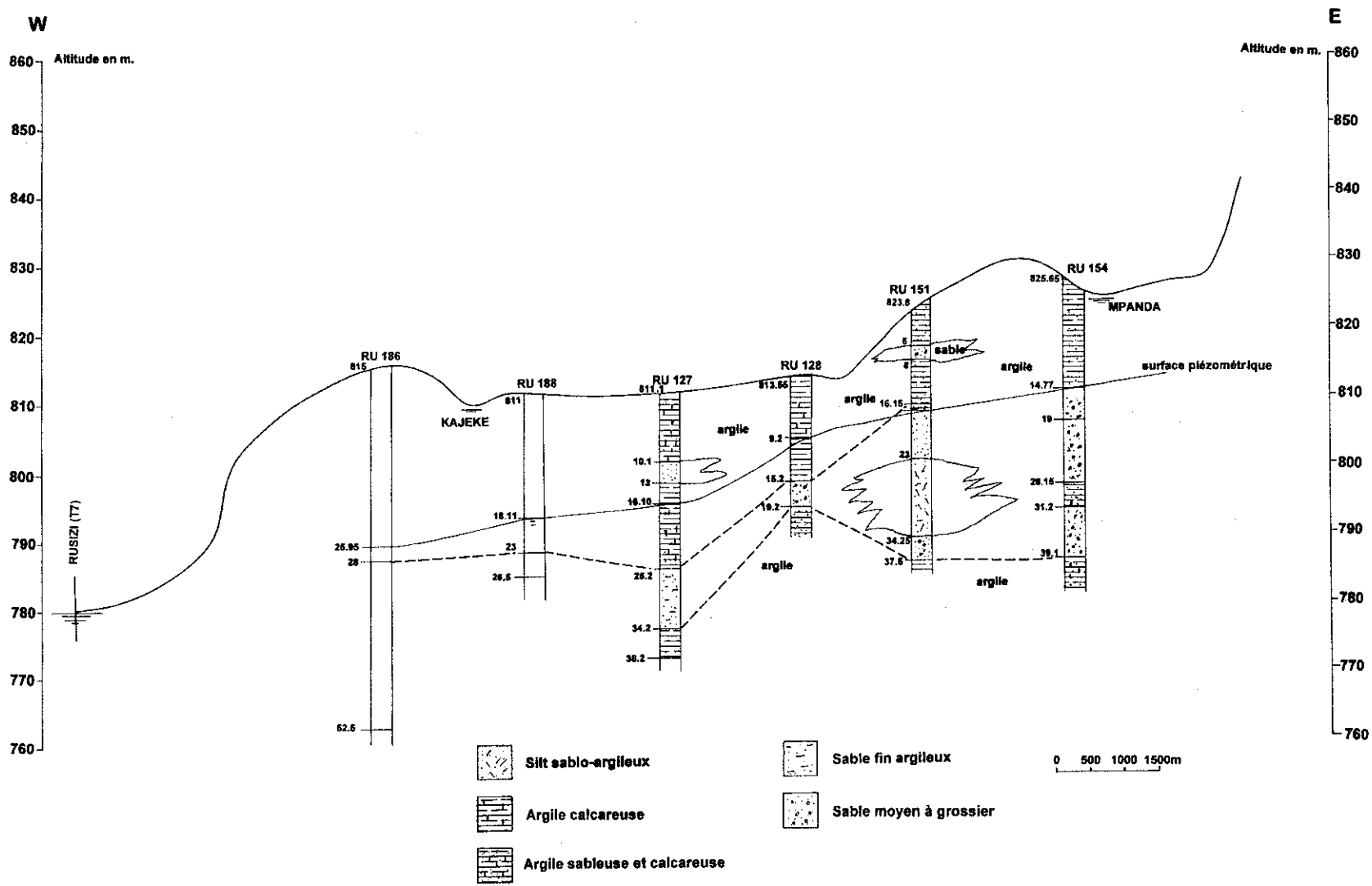


Figure III.18 : Coupe géologique T7

Coupe géologique T 8

De haut en bas, la figure III.19 montre une couche d'argile gris foncé, calcareuse, avec des grains de travertin et mica . Son épaisseur atteint 17 m au forage Ru 118. Elle repose sur un aquifère formé d'une couche épaisse de sable ayant une granulométrie variable. A l'Ouest, c'est un sable fin, parfois argileux ; entre les forages Ru 116 et 117, ce sable est surmonté par un sable moyen à grossier. A l'extrémité de la coupe, l'épaisseur du sable grossier n'est plus que de 4 m. A l'Est, le forage Ru 118 a traversé un aquifère de dépôts fluviatiles. La base de l'aquifère est une argile panachée de vert, devenant sableuse et micacée dans la partie Est de la coupe.

Le tableau 3.8 montre les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T8.

Tableau 3.8

Forage T8	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 184	810	47.50	24.55			27	-
Ru 183	810	39.50	21.50			25.10	-
Ru 116	812	23.45	16.3	19	1.7	13.34	2.96
Ru 117	812.40	28.10	14	18	4	11.50	1.50
Ru 118	819.90	22.20	17	21.20	4.20	14.70	3.3
Ru 82	817	27.50	12.67			12.50	0.17

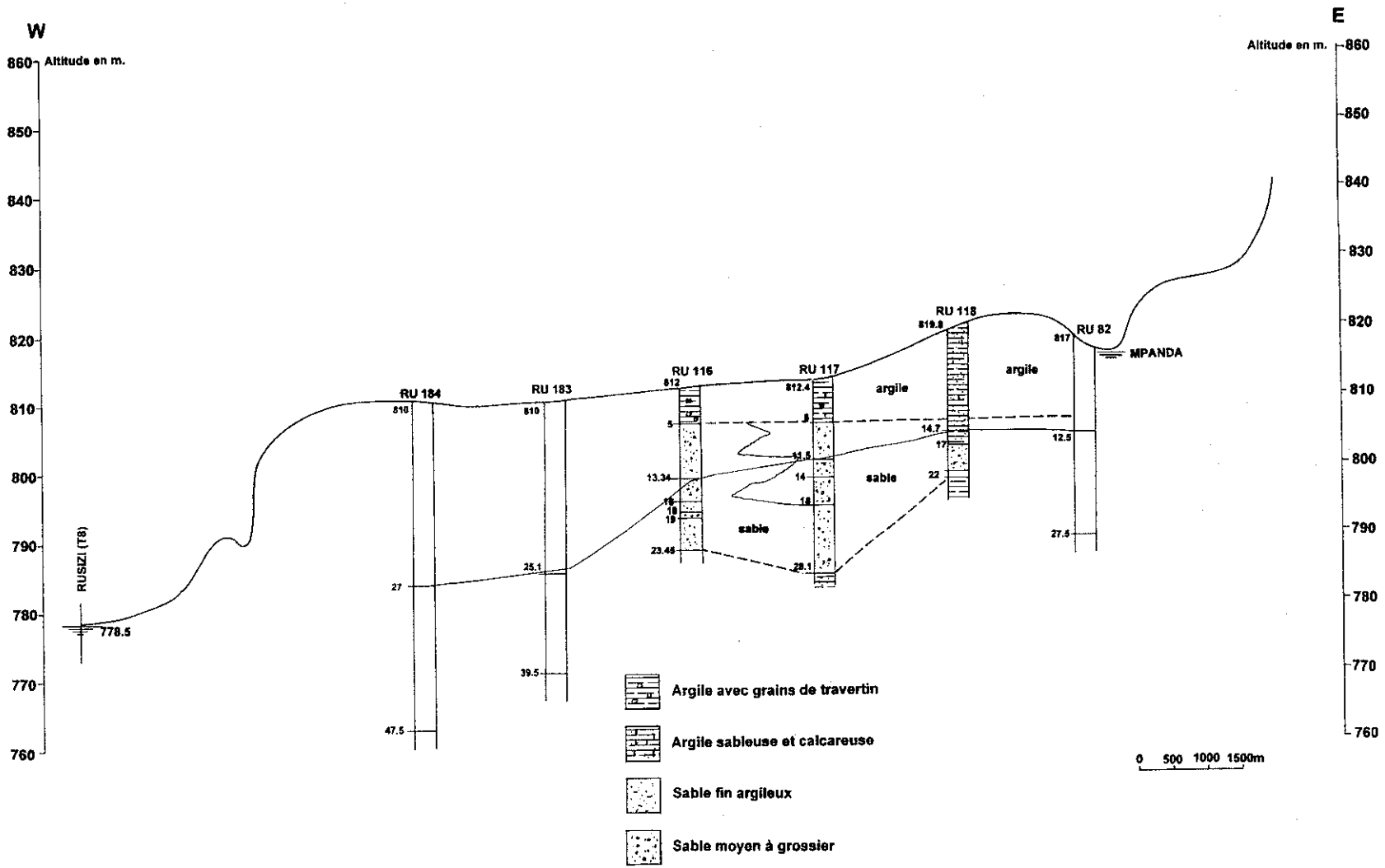


Figure III.19 : Coupe géologique T8

Coupe géologique T 9

A l'Ouest, la figure III.20 montre sur plus de 30 m de profondeur du sable fin gris verdâtre, argileux et micacé, avec des débris de coquillage entre 26 et 28 m, attestant ainsi l'origine lacustre de ces dépôts. Au milieu, ces dépôts s'intercalent dans une argile sableuse, calcareuse et micacée, avec des grains de travertin calcaire, cette dernière constituant ainsi le sommet et la base de l'aquifère.

La nappe a été recoupée dans la couche de sable fin, à des profondeurs variant entre 17 et 26 m de profondeur ; son niveau est remonté de quelques m, mais n'atteint la couche argileuse qui constitue le toit de l'aquifère, sauf au forage Ru 108.

Le tableau 3.9 fournit les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T9.

Tableau 3. 9

Forage T9	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 113	799.80	33.15	26.05	33.15	7.10	11.41	14.64
Ru 112	808	74.15	29			19.20	9.8
Ru 108	805	25.45	17.17			12.70	4.47
Ru 109	809	75.95	7	21.00	14	9	2.50
Ru 110	816.15	29.09	22.15	29.09	6.94	14	8.15

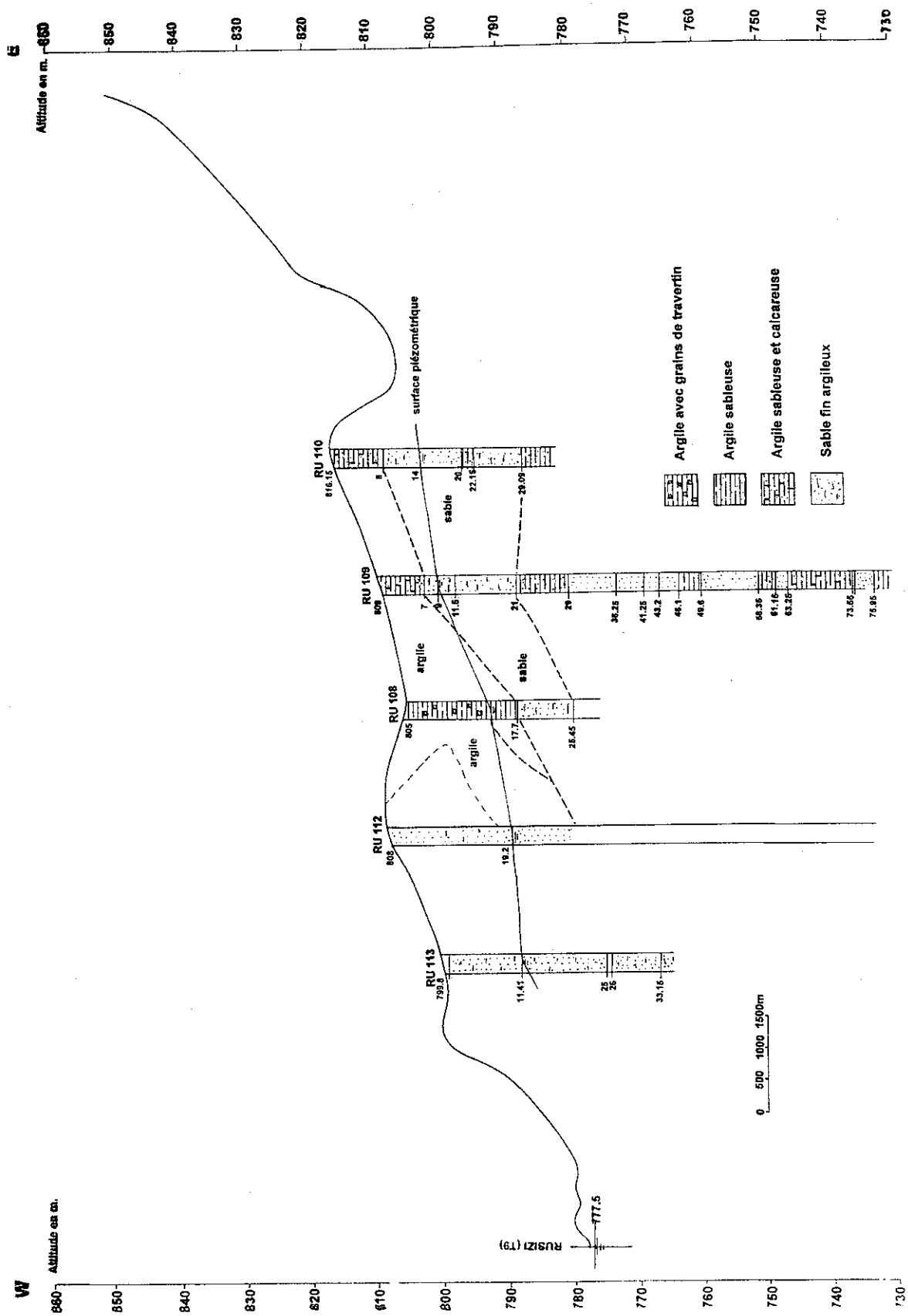


Figure III.20 : COUPE GEOLOGIQUE T9

Coupe géologique T 10

Au niveau de la transversale T 10, la couche argileuse, qui constitue le toit de l'aquifère diminue sensiblement d'épaisseur. Le forage Ru 139, localisé à la limite entre les dépôts fluviatiles et les dépôts lacustres, a traversé sur plus de 25 m un sable fin argileux, qui rappelle un faciès plutôt lacustre. Il a été arrêté à 35 m, toujours dans ce même faciès.

A l'Est, l'épaisseur de ce sable n'est plus que de 9 m. En dessous apparaît une épaisse couche de limon gris verdâtre, légèrement sableux, qui forme la base de l'aquifère.

Le tableau 3.10 affiche paramètres de l'aquifère le long de la transversale T10.

Tableau 3.10

Forage T10	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 139	804.40	35.64	6	35.64	29.64	17.66	0.34
Ru 140	805.75	31.75	6	15	9	11.36	0.24

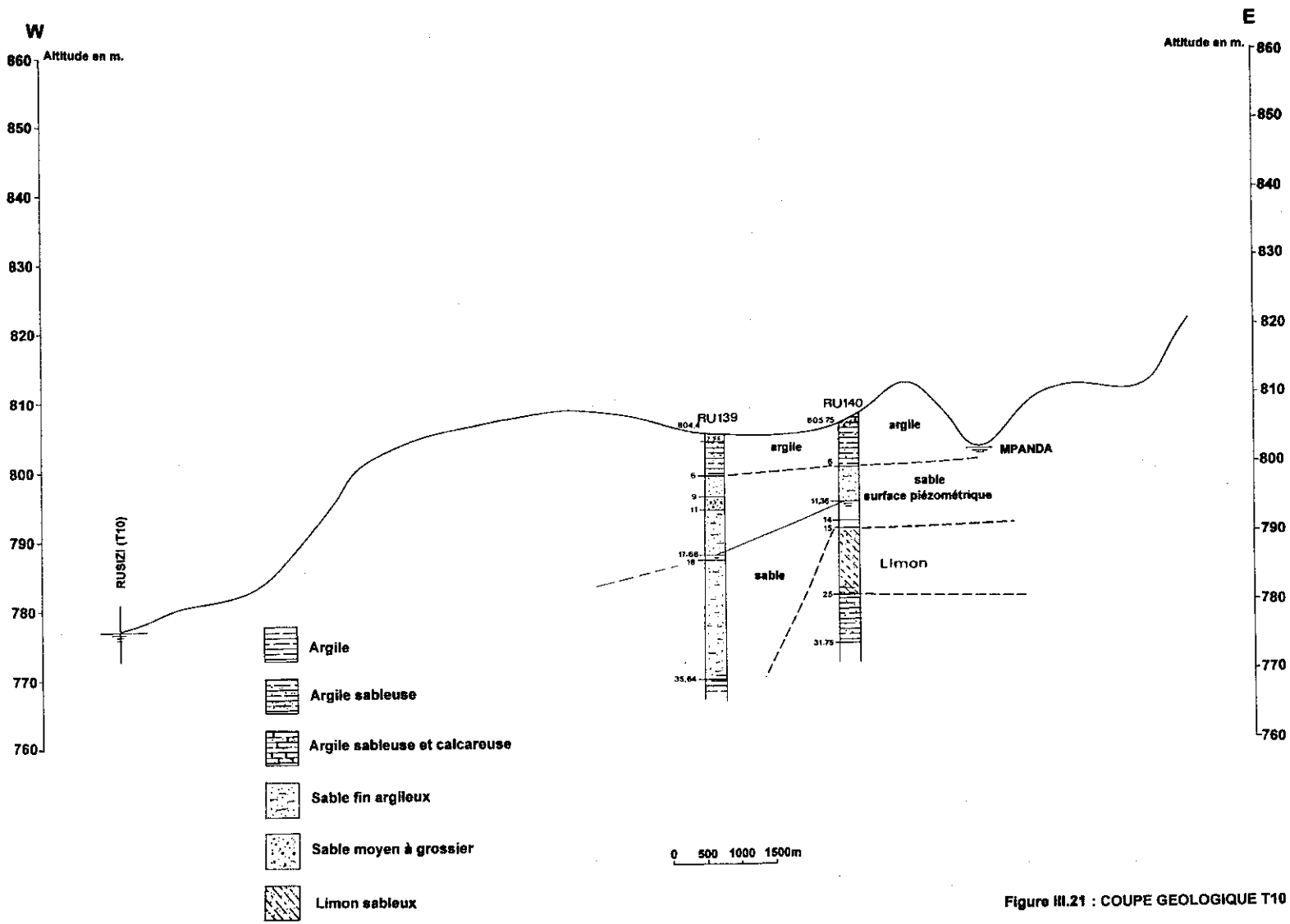


Figure III.21 : COUPE GEOLOGIQUE T10

Coupe géologique T 11

A la surface, on observe un sable moyen à grossier dont l'épaisseur varie entre 5 et 8 m et décrit comme un faciès de barrière littorale (Chorowicz et Thouin, 1985). Ce faciès recouvre un limon jaune à jaune verdâtre qui montre à l'Est un banc de sable très fin, argileux et micacé (Fig.III.22). Le forage Ru 137 s'est arrêté à 31.70 m toujours dans le limon.

Dans le forage Ru 138, la nappe a été captée entre 20 et 30 m dans le sable fin argileux.

Au forage Ru 137, la nappe a été captée dans le limon (?) entre 27 et 31.70 m ; il pourrait s'agir du sable fin rencontré au forage Ru 138. La base de l'aquifère au Ru 138 est un limon jaune verdâtre, très micacé.

Le tableau 3.11 montre les paramètres de l'aquifère au niveau de la transversale T11.

Tableau 3.11

Forage T11	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 137	801.15	31.70	27	31.70	4.70	13.39	13.61
Ru 138	806.95	36.50	20	30	10	16	4

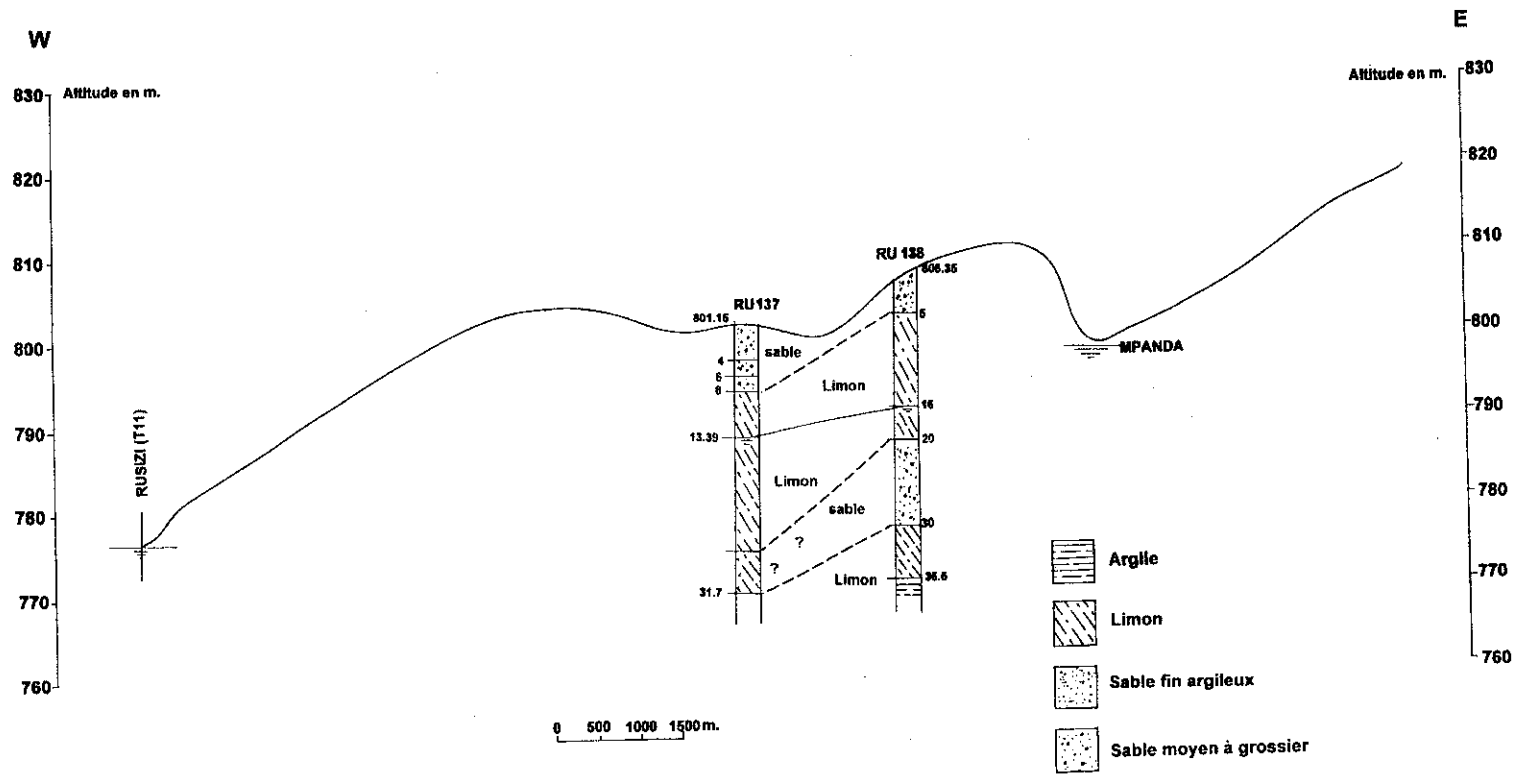


Figure III.22 : COUPE GEOLOGIQUE T11

Coupe géologique T12

Six forages ont été implantés le long de la transversale T12 (Fig.III.23). A l'Ouest, la coupe T12 montre une couche épaisse de limon, qui rappelle le limon rencontré sur la transversale T11. Elle est surmontée par un sable moyen à grossier (faciès de barrière littorale). Cette couche limoneuse, recoupée sur plus de 40 m de profondeur, contient des bancs sablo-argileux. Vers l'Est, l'épaisseur du limon diminue pour disparaître complètement entre les forages Ru 135 et 115. En surface, on trouve une argile gris foncé, sableuse et micacée, qui surmonte une succession de sable fin et moyen, reposant sur une argile verdâtre, sableuse et micacée. La limite entre le limon et les dépôts sablo-argileux se trouve entre les forages Ru 135 et 115.

La description lithologique des forages Ru 178 et 176, réalisés en bas des contreforts de la plaine, n'est pas connue.

Au forage Ru 131, la nappe aquifère a été atteinte dans le limon ; son toit et sa base sont peu définis, le niveau piézométrique étant situé dans le limon.

Vers l'Est, au forage Ru 115, la nappe est cantonné dans un sable fin argileux et est limitée au sommet comme à la base par une argile sableuse micacée.

Le tableau T12 montre les principaux paramètres de l'aquifère au droit de la transversale T12.

Tableau 3.12

Forage T12	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 131	799.45	55	15	41	26	12.50	2.50
Ru 135	798	29.34	19	29.34	10.34	12.80	6.2
Ru 115	803	21.40	15.56	20	4.44	11.80	3.76
Ru 178	818	20	11.35			8.00	3.35
Ru 176	835	21	15			8.05	6.95
Ru 171	872	42.50	18			22.20	-

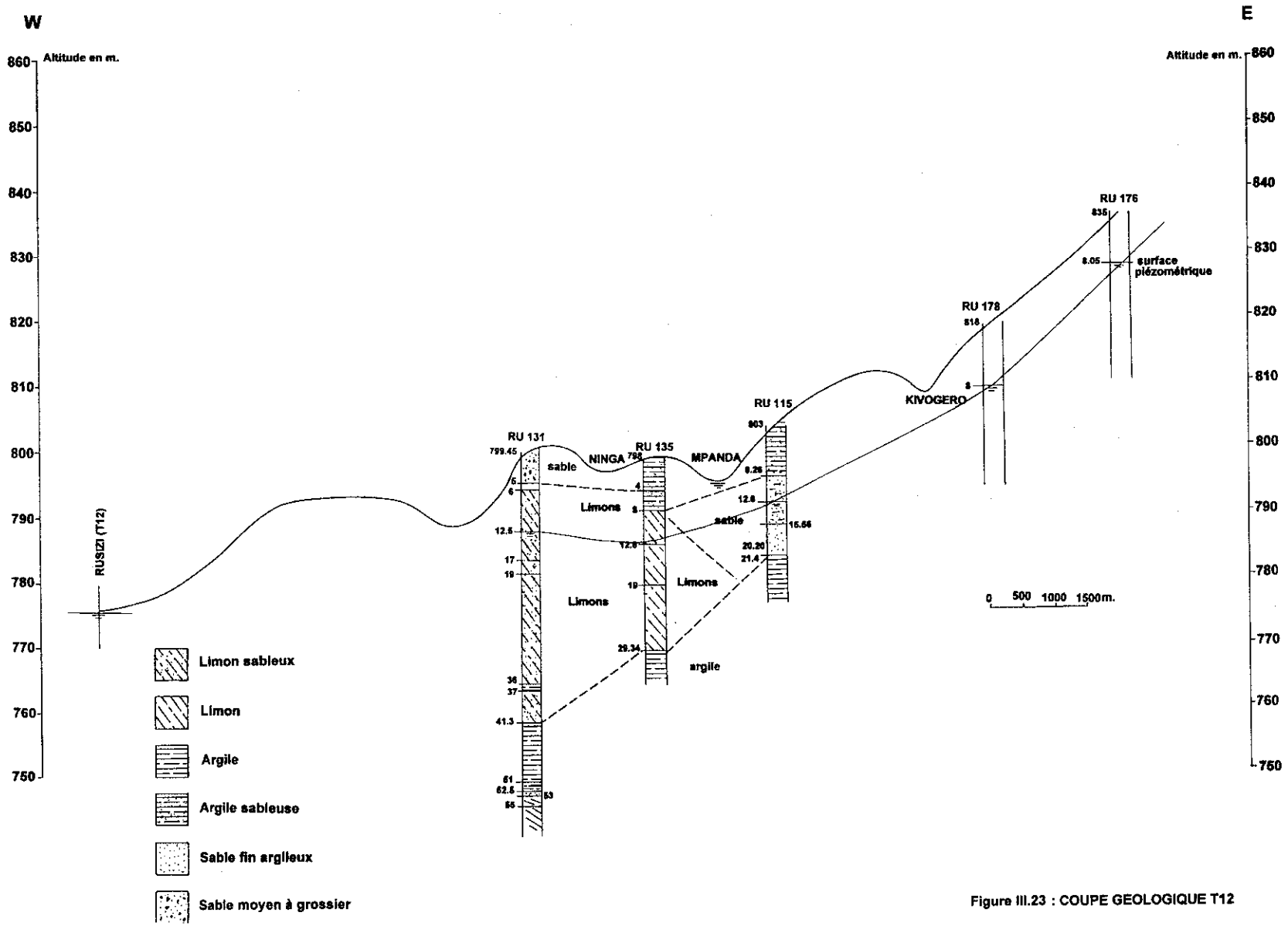


Figure III.23 : COUPE GEOLOGIQUE T12

Coupe géologique T 13

Quatre forages ont été implantés le long de la transversale T 13 ; seuls les forages Ru 107 et 106, dont la description lithologique est connue, sont repris à la fig.III.24. A l'Ouest, la coupe T13 montre en surface une couche d'argile ; vers l'Est, cette couche est surmontée par un sable moyen à grossier. En dessous, on observe des dépôts sablo-argileux : des sables grossiers, puis des sables fins à très fins et argileux . La base de l'aquifère est une argile verdâtre, sableuse et micacée.

La nappe a été recoupée à 21 m de profondeur, dans un sable fin argileux au forage Ru 107, dans un sable moyen à grossier au forage Ru 106. La nature lithologique de l'aquifère varie donc souvent, même entre deux forages proches. Dans les forages Ru 179 et Ru 180 situés à l'extrémité de la plaine, l'aquifère se trouve à moins de 12 m de profondeur.

Une remontée de l'eau été observée dans tous les forages, montrant ainsi le caractère captif de la nappe. Le tableau 3.13 fournit les principaux paramètres de l'aquifère au droit de la transversale T13.

Tableau 3.13

Forage T13	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 107	793.50	32	22	29	7	7.53	13.47
Ru 106	804.2	25.50	21	25.50	4.50	13.40	7.6
Ru 179	826.22	26.50	9.25			3.47	5.78
Ru 180	858	26.50	11.30			8	3.30

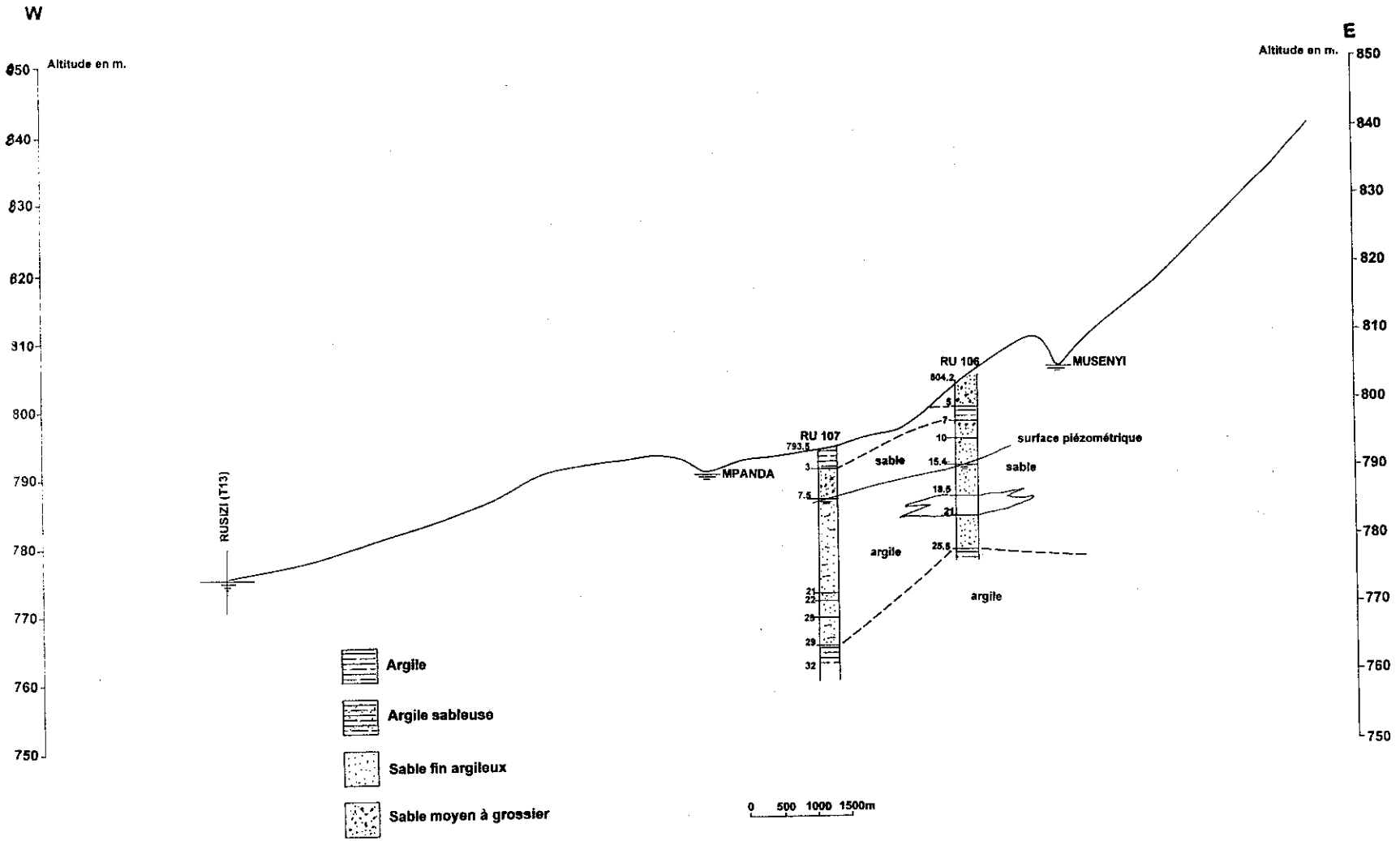


Figure III.24 : COUPE GEOLOGIQUE T13

Coupe géologique T 14

Cette transversale compte trois forages: Ru 166, 104 et Ru 105 (Fig.III.25). Le forage Ru 166 localisé près de la rivière Mpanda, a traversé sur 14.80 m une alternance d'argile sableuse et de sable argileux. Ce sont probablement des dépôts fluviatiles de la rivière Mpanda. Le nappe a été recoupée à 13 m dans un sable graveleux, feldspathique, intercalé entre deux couches argileuses. Son épaisseur ne dépasse pas 1.80 m.

Vers l'Est, le forage Ru 104 a traversé ces dépôts sur 46.80 m de profondeur. Des dépôts sableux, légèrement formés par une alternance de sable grossier et de sable fin, sont observés jusqu'à 22 m de profondeur. En dessous, on trouve une épaisse couche d'argile avec une passe sableuse entre 43 et 46 m de profondeur.

Le forage Ru 105 recoupe une alternance de sable fin, moyen et grossier avec des intercalations argileuses. La nappe, atteinte à 19.40 m, a été captée à partir de 28 m, dans un sable moyen à grossier, avec à la base une argile sablo-graveleuse située à 30.60 m. La lithologie traversée par ce forage est semblable à celle des forages Ru 107 et 106 de la coupe géologique T 13.

Deux niveaux aquifères ont été mis en évidence dans le forage Ru 105 : entre 19,40 et 20,80 m et, entre 28 et 30,60 m.

Dans le forage Ru 104, l'eau a été atteinte à 24.80 m de profondeur et la nappe aquifère serait localisée dans une passe de sable grossier situé entre 43.80 et 44.80 m, avec à la base une couche d'argile sableuse et micacée.
Le tableau 3.14 fournit les principaux paramètres de l'aquifère au droit de la transversale T14.

Tableau 3.14

Forage T14	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 166	787	14.80	13	14.80	1.80	7.81	5.19
Ru 104	789	46.80	43.80	44.80	1	6.24	18.56
Ru 105	796	36.50	28	30.60	2.60	9.33	10.07

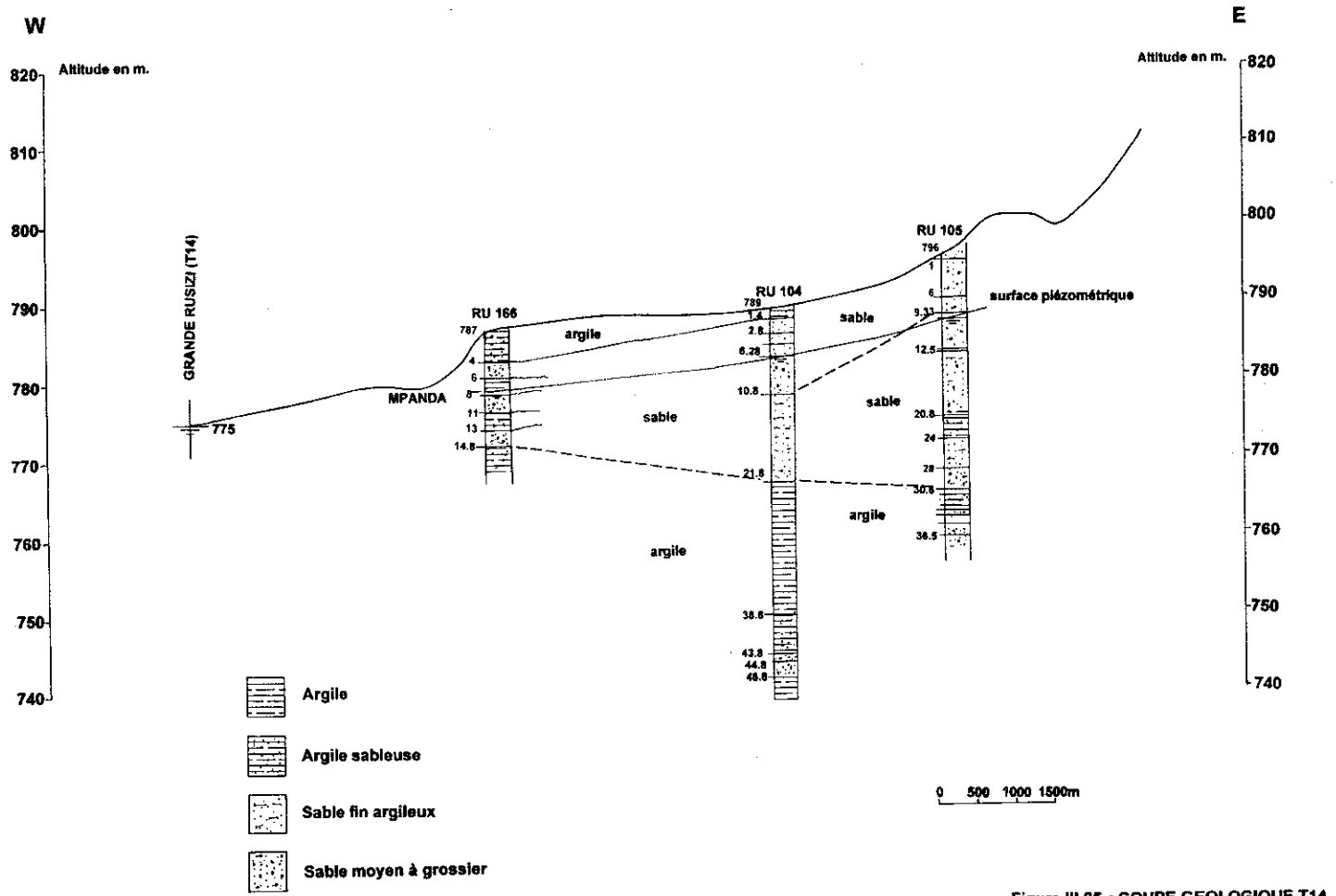


Figure III.25 : COUPE GEOLOGIQUE T14

Coupe géologique T 15

Quatre forages ont été implantés au droit de la transversale T15. De haut en bas, la coupe géologique T15 (Fig.III.26) montre une argile grise sableuse micacée dont l'épaisseur varie entre 2 et 4 m ; vers l'Est, son épaisseur diminue pour disparaître complètement au forage Ru 103.

Cette argile coiffe une couche sableuse très épaisse au sein de laquelle des sables moyens à grossiers reposent sur des sables fins à très fins. Dans le forage Ru 103, des débris de coquillages ont été trouvés entre 1 et 4 m de profondeur, attestant ainsi l'origine lacustre de ces dépôts.
Dans la partie Ouest, l'épaisseur de ces sables n'est pas connue. A l'Est, la base de ces sables est une argile grise à gris foncé, sableuse et micacée.

Les archives hydrologiques mentionnent deux nappes mises en évidence par les forages Ru 102 et 103. La corrélation de ces forages avec les forages Ru 172 et Ru 174 permet d'affirmer qu'il s'agit plutôt d'une seule nappe aquifère contenant un banc argileux assez épais au Ru 103 (7 m). L'épaisseur de ce banc diminue progressivement vers l'ouest pour disparaître entre Ru 102 et Ru 174. Dans cette zone, l'épaisseur de la nappe augmente sensiblement pour atteindre 15 m au Ru 172.

Le tableau 3.15 fournit les principaux paramètres de l'aquifère au droit de la transversale T15.

Tableau 3.15

Forage T15	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 172	779	32	8	23	15	7.32	0.68
Ru 174	779	23.87	12	23.87	11.87	5	7
Ru 102	786	22.23	3.33	22.23	18.9	4.64	-
Ru 103	788	26.06	6	13.60	7.60	3.18	2.82

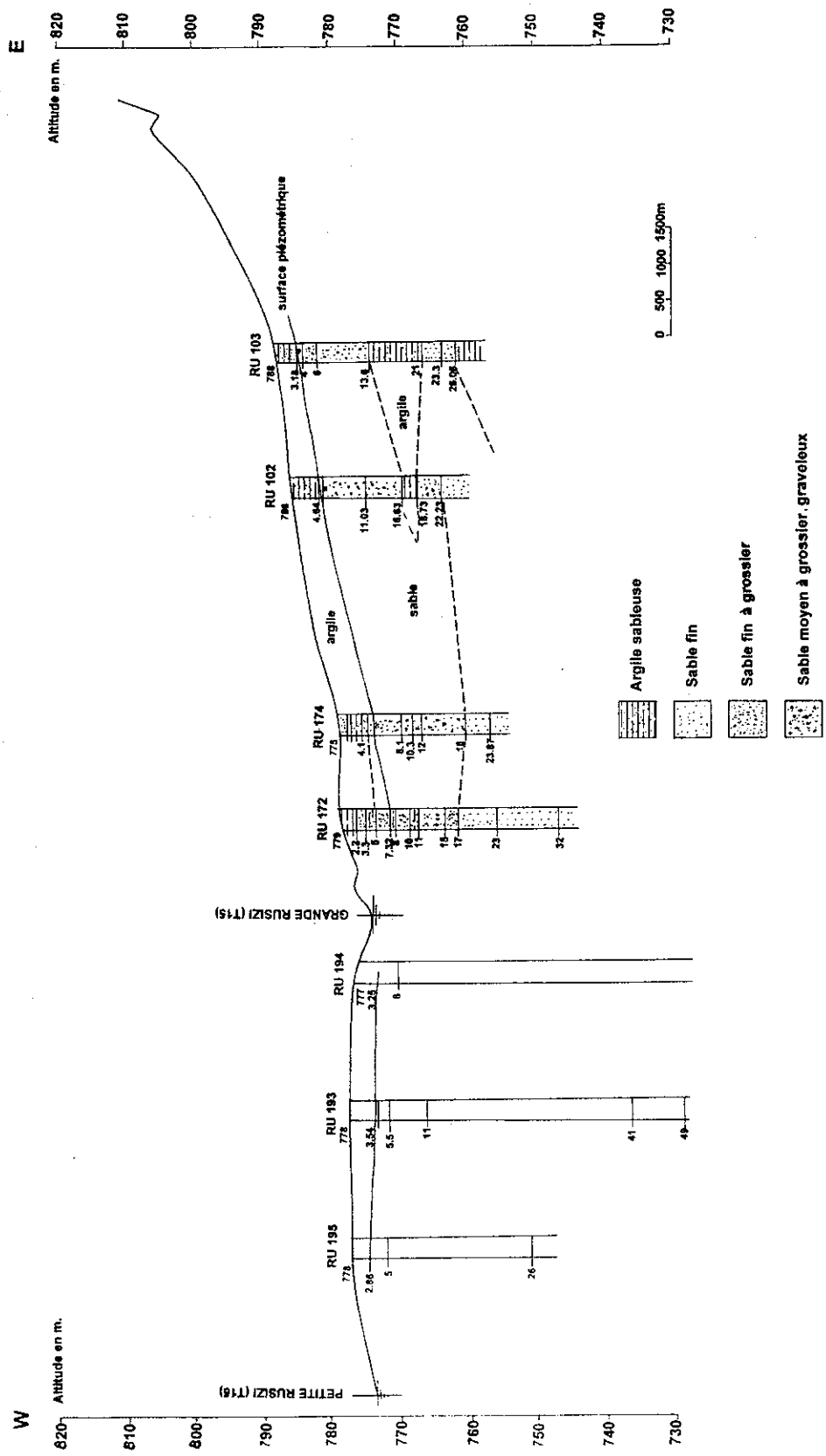


Figure III.26 : COUPE GEOLOGIQUE T15

Coupe géologique T 16

A l'Ouest, la coupe géologique T16 (Fig.III.27) montre une lithologie semblable à celle de la coupe précédente. A la surface, on observe une couche argilo-sableuse et micacée dont l'épaisseur maximale atteint 7 m. Cette couche repose sur un sable grossier argileux, celui-ci montrant à la base un sable fin gris clair et micacé. Les forages Ru 173 et Ru 169 ont été arrêtés dans ce sable fin.

Au forage Ru 238, le sable grossier se trouve à la surface et est séparé du sable fin par une couche d'argile sableuse, fine et micacée . A la base du sable fin, on trouve de l'argile sableuse avec une passe de sable fin entre 47 et 50 m et devenant indurée en profondeur (Ru 238).

A l'Est, le forage Ru 153, localisé à l'extrémité de la plaine montre une alternance de limon, sable et argile silto-graveleuse constituant des dépôts de piedmont.

A l'Est, la nappe est cantonnée dans un banc de sable graveleux entre 24 et 27 m de profondeur (Ru 153) ; le sommet est formé d'argile silto-graveleuse et la base par un limon sablo-graveleux.

Au milieu de la plaine, la nappe se trouve dans la couche de sable fin, limitée en haut par une argile fine micacée et en bas, par une argile sableuse cohérente, devenant compacte et indurée avec la profondeur.

Tout près du lac Tanganyika, la nappe se trouve dans un sable grossier.

Le tableau 3.16 montre les paramètres de l'aquifère le long de la transversale T16.

Tableau 3.16

Forage	Cote	Prof.totale	Sommet	Base	Epaisseur	Niveau	Remontée
T16	(m)	(m)	aquifère (m)	aquifère(m)	aquifère (m)	piézo (m)	(m)
Ru 173	778	21.00	7	21	14	1.50	6.50
Ru 169	778.5	29.33	6	29.33	21.24	8.09	-
Ru 238	784	65.00	16	38	24	6.65	9.35
Ru 153	818	28.50	24	27	3	14.60	-

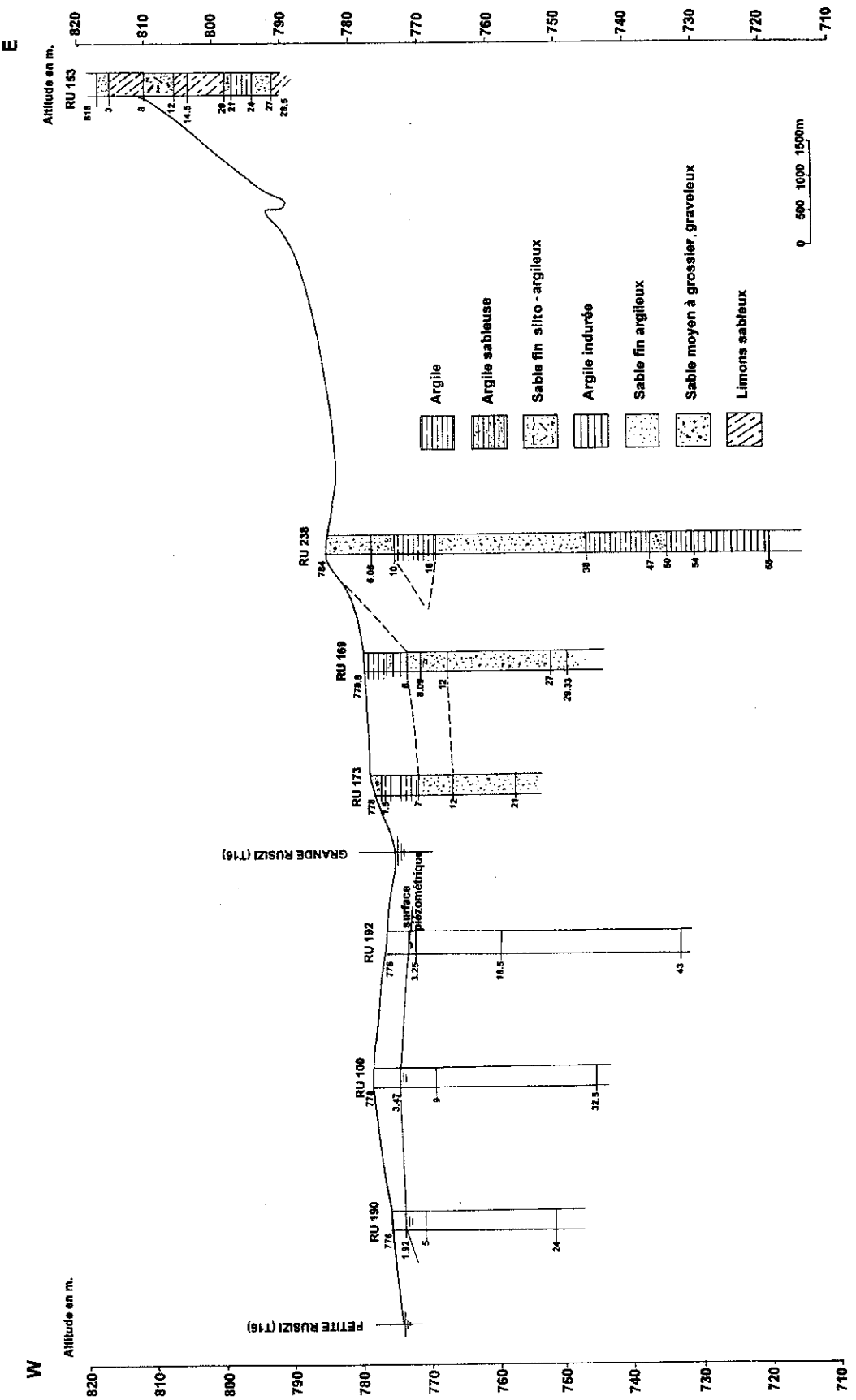


Figure III.27 : COUPE GEOLOGIQUE T16

Coupe géologique T 17

Tout près du lac Tanganyika, la coupe T17 (Fig.III.28) est établie à partir de cinq forages. Elle montre à la surface une couche de sable fin dont l'épaisseur n'excède pas 3 m. Ce sable couvre une argile gris foncé, sableuse et micacée. En dessous, on trouve du sable grossier renfermant du mica. A l'Ouest (Ru 175) , la base de ce sable est formée par une argile grise, sableuse et micacée ; au milieu, le sable grossier repose sur du sable argileux très fin .

A l'Est, la coupe T17 se termine par une alternance de dépôts du colluvium, à la limite entre la plaine et les contreforts. Il s'agit d'une argile sableuse à sablo-graveleuse, parfois calcareuse au sein de laquelle s'intercalent des bancs sableux à granulométrie variable : on observe du sable fin à grossier, souvent graveleux et renfermant du mica.

A l'extrémité de la plaine, la nappe a été atteinte à 21 m de profondeur, dans un sable fin à grossier, légèrement argileux, devenant très fin à la base. Le sommet de la nappe est constitué par une argile très sableuse et calcareuse contenant des niveaux de sable et de cailloux roulés de quartz.

Au voisinage du lac, la nappe a été recoupée entre 4 et 7 m de profondeur, dans un sable fin à grossier, limité au dessus par de l'argile sableuse. La base de l'aquifère est une argile sableuse, passant à un sable argileux très fin tout près de l'aéroport de Bujumbura.

Le tableau 3.17 reprend les principaux paramètres de l'aquifère le long de la transversale T17.

Tableau 3.17

Forage T17	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ru 175	776	18.00	7	17	10	3.75	3.25
Ru 177	779	20.92	5.30	11	5.70	4.47	-
Ru 147-1	798	26.50	14	26.50	12.50	13	1
Ru 167-1	807	23.00	13.20	19	5.80	11.20	2
Ru 170-4	825	25.50	21	25.50	4.50	13.42	7.58

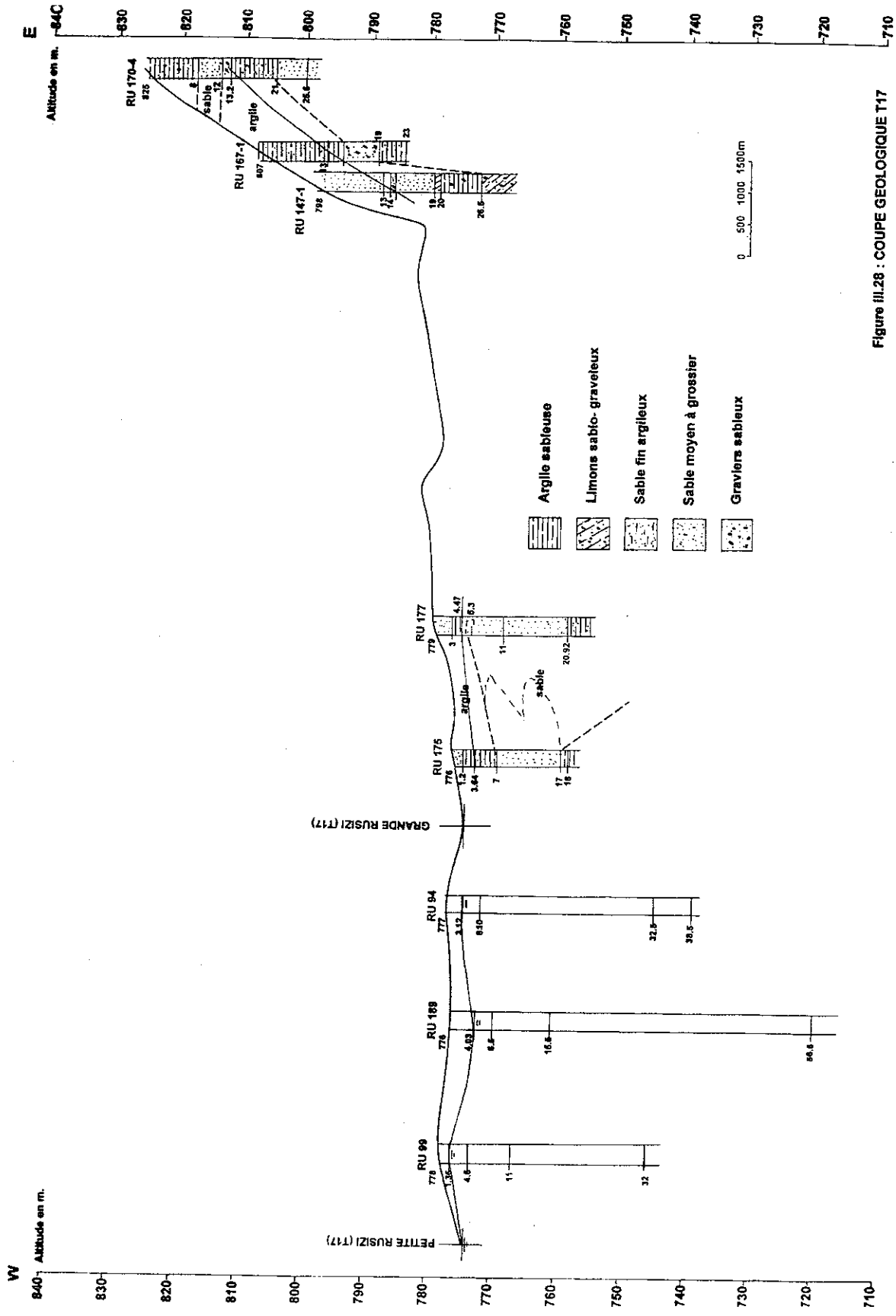


Figure III.28 : COUPE GEOLOGIQUE T17

Partie congolaise de la plaine

La réinterprétation de 14 forages disséminés dans la partie congolaise de la plaine de la basse Rusizi (Fig.III.29) permet de dresser un schéma interprétatif de son sous-sol.

A proximité de la limite entre la plaine et les contreforts, le forage Ki 43 dont la cote au niveau du sol atteint 870 m, a traversé sur 69 m de profondeur une succession de dépôts sableux argileux : sable fin argileux avec quelques passes de sable grossier ou graveleux. Au Nord, la nappe a été atteinte à une grande profondeur : 58 m dans la forage Ki 43. Cette profondeur diminue vers le Sud : elle n'est plus que de 11,50 m dans le forage Ki 41 situé tout près du lac Tanganyika.

Ce faciès, avec parfois des niveaux de cailloux quartzeux et feldspathiques, est observé dans tous les forages implantés à proximité des contreforts de la plaine à savoir : Ki 37, Ki 38, Ki 51, Ki 39 et Ki 41. Il s'agit vraisemblablement des dépôts de colluvium. A part les forages Ki 38 et Ki 39 qui ont été arrêtés dans une argile sableuse, tous les autres présentent à la base toujours du sable argileux.

Vers l'Est, les forages Ki 223 et 197 ont traversé une argile brune, sableuse et calcareuse, avant d'atteindre un sable fin à très fin à 16 m de profondeur. Le forage Ki 197 a été arrêté à 36,50 m de profondeur, toujours dans le même sable. Il s'agit d'un faciès de dépôts lacustres recouverts par des dépôts fluviatiles.

Les forages Ki 225 et Ki 192 montrent une alternance d'argile sableuse et de gravier ou sable grossier. Il s'agit d'un faciès de dépôts fluviatiles.
La nappe a été captée dans les niveaux sableux ou graveleux. La base de la nappe est une argile brune contenant des éléments de quartz et de feldspaths.

Près de la petite Rusizi, les forages Ki 199, Ki 221 et KI 222 présentent une succession de sables fins à grossiers, avec quelques passes argileuses.

La nappe a été captée dans un sable grossier quartzeux entre 8 et 10 m de profondeur.

Au Sud, tout près du lac Tanganyika, le forage Ki 52/1 a traversé du sable fin à grossier blanc jaune, micacé, avec de nombreux grains noirs de tourmaline et de magnétite. A la base, on trouve du sable très fin, micacé et argileux. La nappe a été trouvée à 6,50 m de profondeur, dans un sable très fin renfermant du gravier fin.
Le tableau 3.18 fournit les principaux paramètres de l'aquifère dans la partie congolaise de la plaine.

Forage	Cote (m)	Prof.totale (m)	Sommet aquifère (m)	Base aquifère(m)	Epaisseur aquifère (m)	Niveau piézo (m)	Remontée (m)
Ki 43	870	69	58	69	11	48.50	9.5
Ki 37	830	33.50	29	33.50	4.50	23.30	5.7
Ki 38	820	28	13.50	28	14.50	13.50	-
Ki 51	804	32	15	32	17	6.04	8.96
Ki 39	815	30	20.50	30	9.50	18	2.5
Ki 41	800	28	11.50	28	16.5	6.90	4.6
Ki 223	805	21	16.50	21	4.50	0.90	15.6
Ki 197	805	36.50	18	36.50	18.50	6	12
Ki 225	800	15	8.50	12	3.50	1.10	7.4
Ki 192	795	24.50	17	22.50	5.50	3.1	13.9
Ki 199	793	15	10.90	14.50	3.60	3.60	3.60
Ki 221	795	15.30	8.50	15.30	6.80	5	3.50
Ki 222	795	20	10	13.50	3.50	4.8	5.2
Ki 52/1	785	26	6.50	26	19.50	2.20	4.3

Tableau 3.18 : Paramètres de l'aquifère dans la partie congolaise.

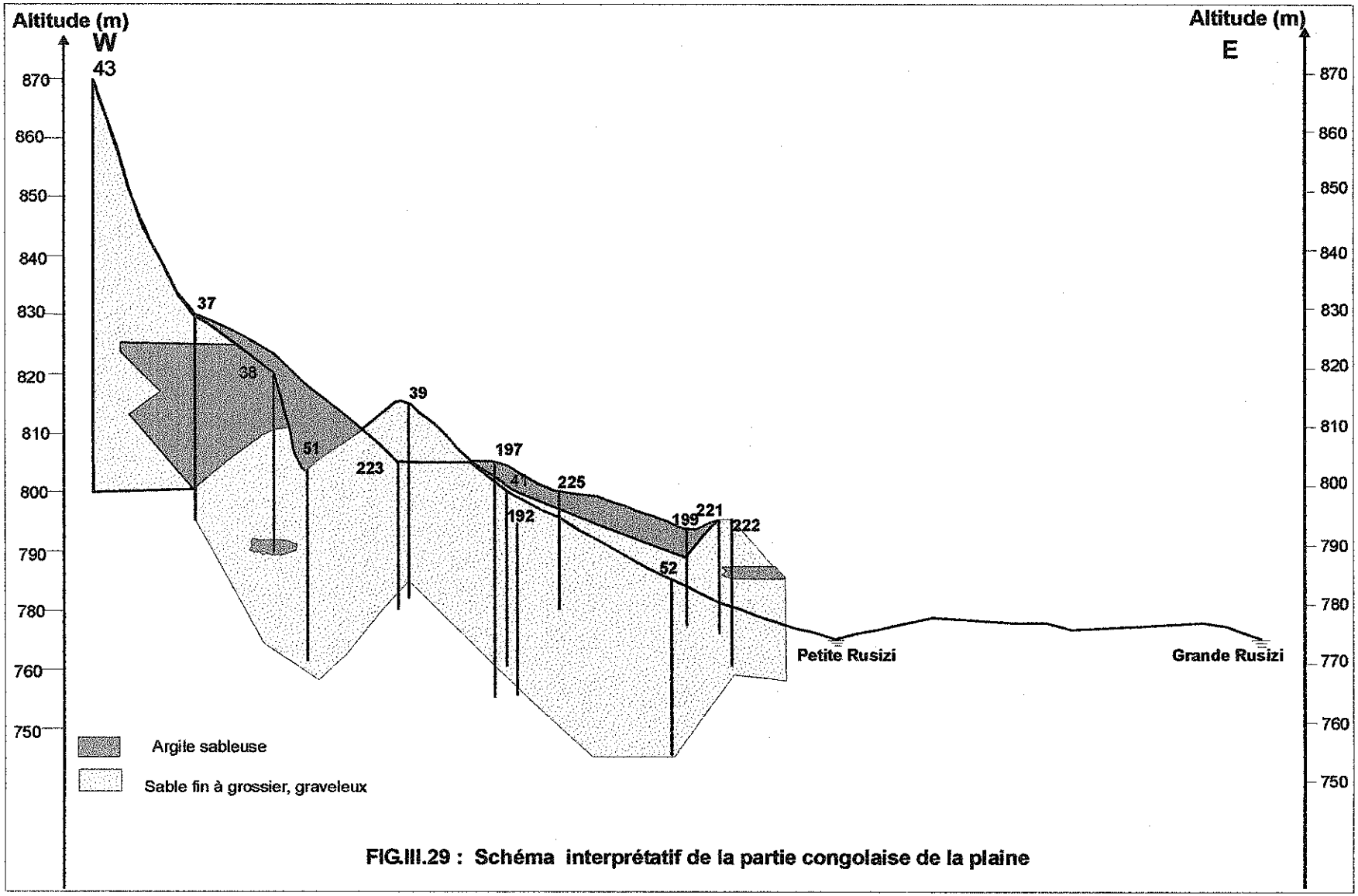


FIG.III.29 : Schéma interprétatif de la partie congolaise de la plaine

III.3.3. Conclusions

Dans la moyenne Rusizi, les forages implantés ont traversé des argiles rouges, produits d'altération des basaltes. Dans cette zone, même le forage Ru 247, le plus profond (38 m), n'a pas atteint la nappe aquifère. Il a été arrêté dans les basaltes.

Dans les formations alluvionnaires, les forages ont mis en évidences deux ensembles caractéristiques séparés par une discontinuité (Waleffe, 1989) :

- une formation supérieure composée de sable, argile, argile sableuse, gravier ; les niveaux argileux contiennent souvent des débris divers, dont fréquemment des schistes tendres de la formation inférieure ;

- une formation inférieure composée de schistes tendres de teinte grise, brune, verdâtre et de grès tendres avec intercalations de gravier ; les grès et surtout les schistes tendres contiennent fréquemment des débris végétaux et parfois de la vivianite.

A Rugombo, la nappe a été touchée dans un niveau de sable et gravier, compris dans la formation de schiste tendre.

A Cibitoke, la première nappe se trouve à 35 m de profondeur, au dessus des schistes tendres.

A Kasenyi et Kundava, la nappe a été touchée dans une passe gréseuse intercalée dans la formation sédimentaire inférieure.

A Kagunuzi, les forages Ru 227 et 228 ont touché la nappe à des profondeurs respectives de 30 et 38 m dans des sables fins micacés.

Les forages qui ont investigué la basse Rusizi ont mis en évidence une nappe aquifère localisée dans des bancs sableux, exception faite des forages Ru 129 et Ru 132 où l'aquifère est un gravier fin roulé et quartzeux.

Les coupes géologiques ont montré la structure et la configuration de la nappe sur chaque transversale.

D'Est en Ouest, l'aquifère change de lithologie :

- dans les dépôts des affluents de la Rusizi, il s'agit d'un sable graveleux d'épaisseur réduite (1 à 3 m), intercalé dans les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi ;

- au milieu de la plaine, on passe du sable graveleux à un sable fin argileux. On se trouve dans les dépôts lacustres ;

- vers le sud, on est en présence d'un sable grossier (cordons littoraux) qui recouvre un sable fin dont l'épaisseur n'est pas connue, les forages hydrologiques s'étant arrêtés dans ce dernier niveau.

Dans les dépôts des affluents de la Rusizi, le toit et la base sont formés d'argiles sableuses calcareuses. L'épaisseur du toit diminue progressivement vers le sud.

Le forage Ru 165 situé sur la transversale T3 à l'extrémité de la plaine a atteint le soubassement formé d'arène de gneiss à biotite qui rappelle les roches précambriennes du Burundien.

Certains forages situés près du lac ont recoupé directement des sables grossiers ayant à la base des sables fins argileux dont l'épaisseur n'est pas connue.

Les limites latérales de l'aquifère en bordure de la plaine sont constituées par des roches précambriennes qui composent les contreforts de la plaine, aussi bien du coté congolais que du côté burundais.

La lithologie montrée par le forage Ru 158 (T3), situé à l'Ouest de Ru 157, appartiendrait plutôt aux alluvions de la Rusizi qu'aux dépôts lacustres comme semble l'indiquer sa localisation. De même, la lithologie traversée par le forage Ru 143 place celui-ci dans les dépôts lacustres au lieu de dépôts fluviatiles. Nous proposons donc une légère modification de la carte géologique en plaçant la limite de dépôts fluviatiles de la Rusizi à l'est du forage Ru 158 et les dépôts lacustres à l'est du forage Ru 143.

La réinterprétation des logs lithologiques de forages a permis de suivre progressivement les changements fréquents de la lithologie de la plaine, tant verticalement que latéralement. Les schémas interprétatifs établis entre les transversales T1 et T4 (Fig.III.30) ; T5 et T8 (Fig.III.31) ; T9 et T17 (Fig.III.32) montrent la configuration de la première nappe aquifère à différents endroits de la plaine.

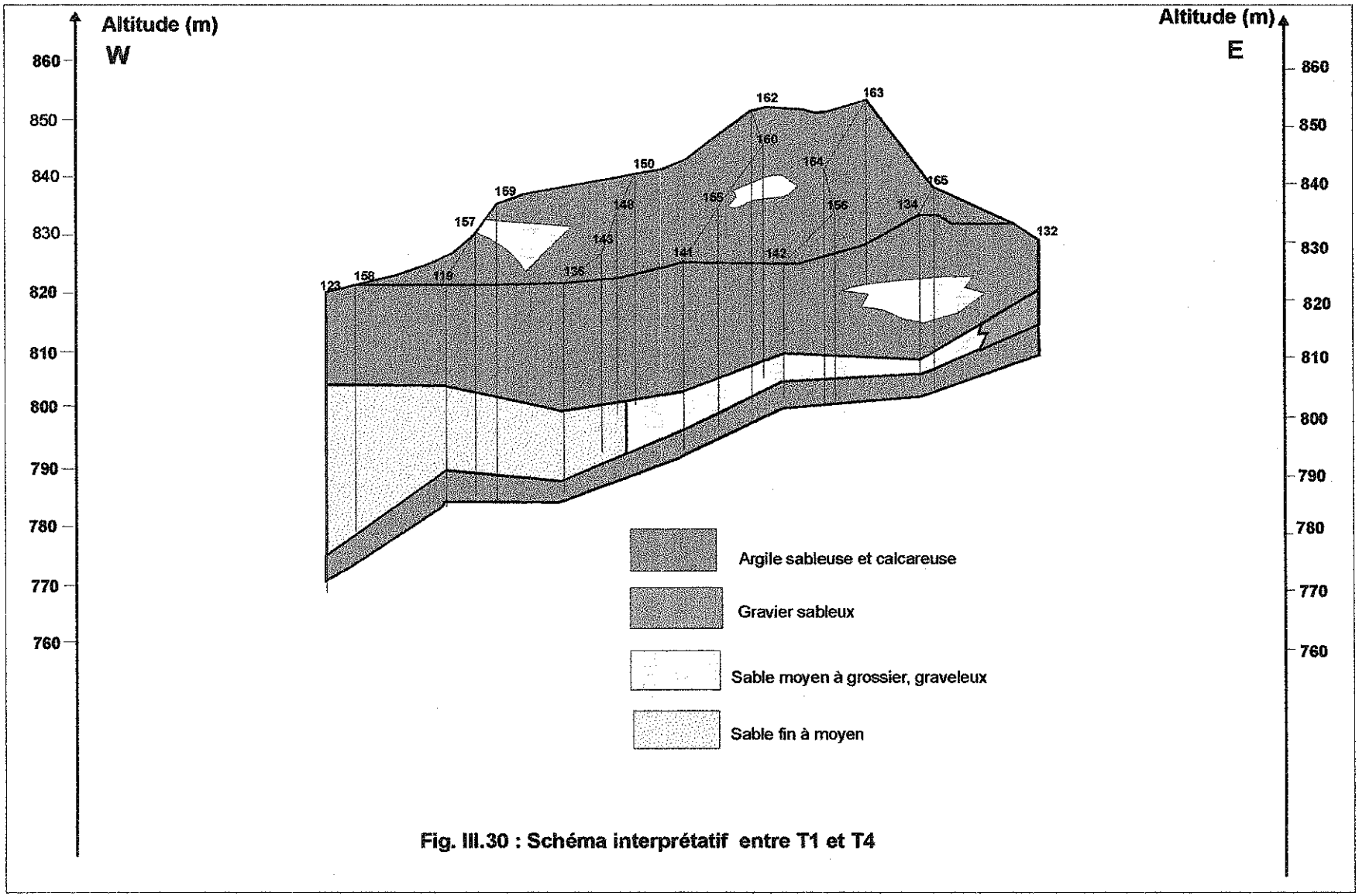


Fig. III.30 : Schéma interprétatif entre T1 et T4

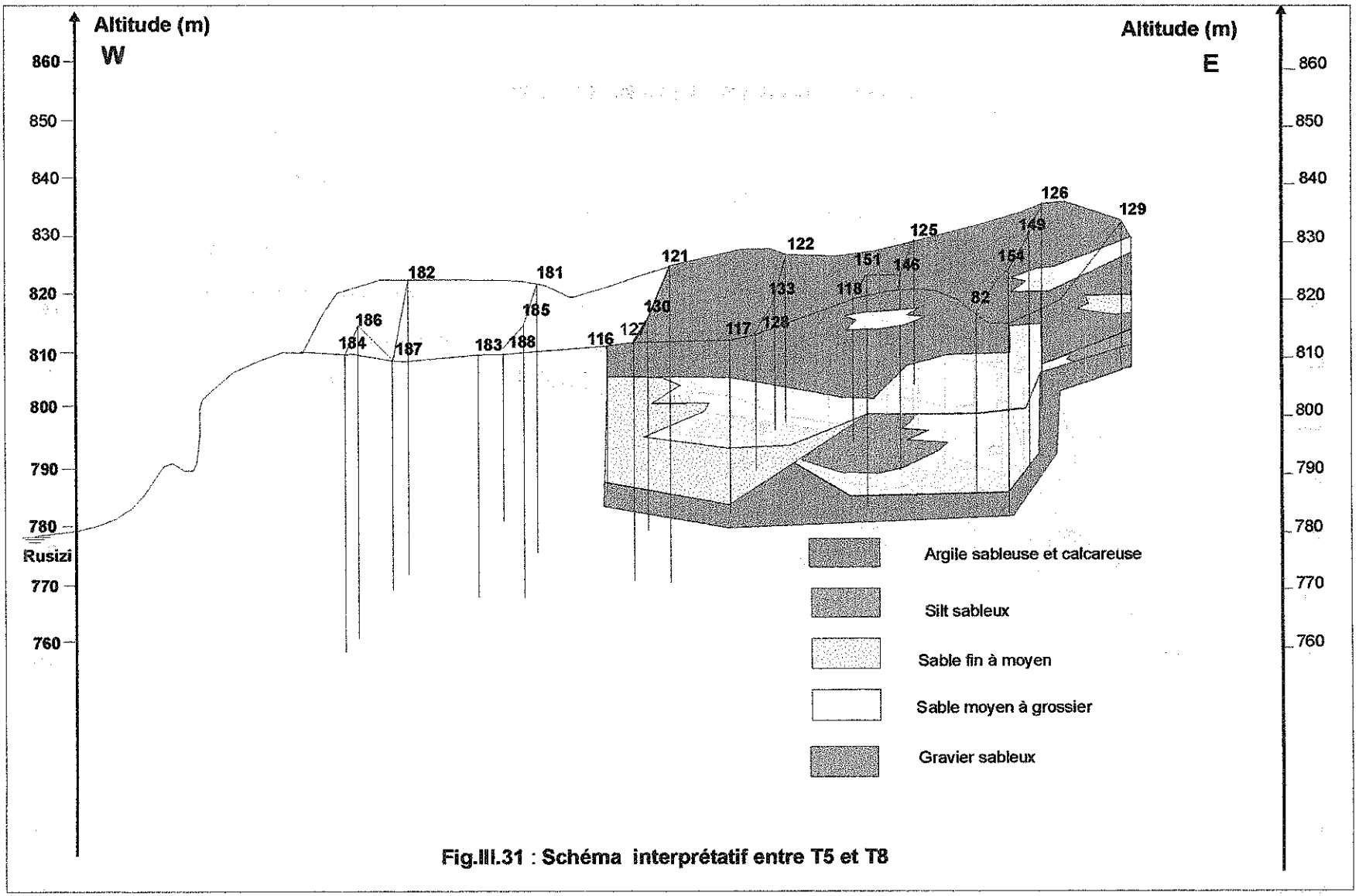


Fig.III.31 : Schéma interprétatif entre T5 et T8

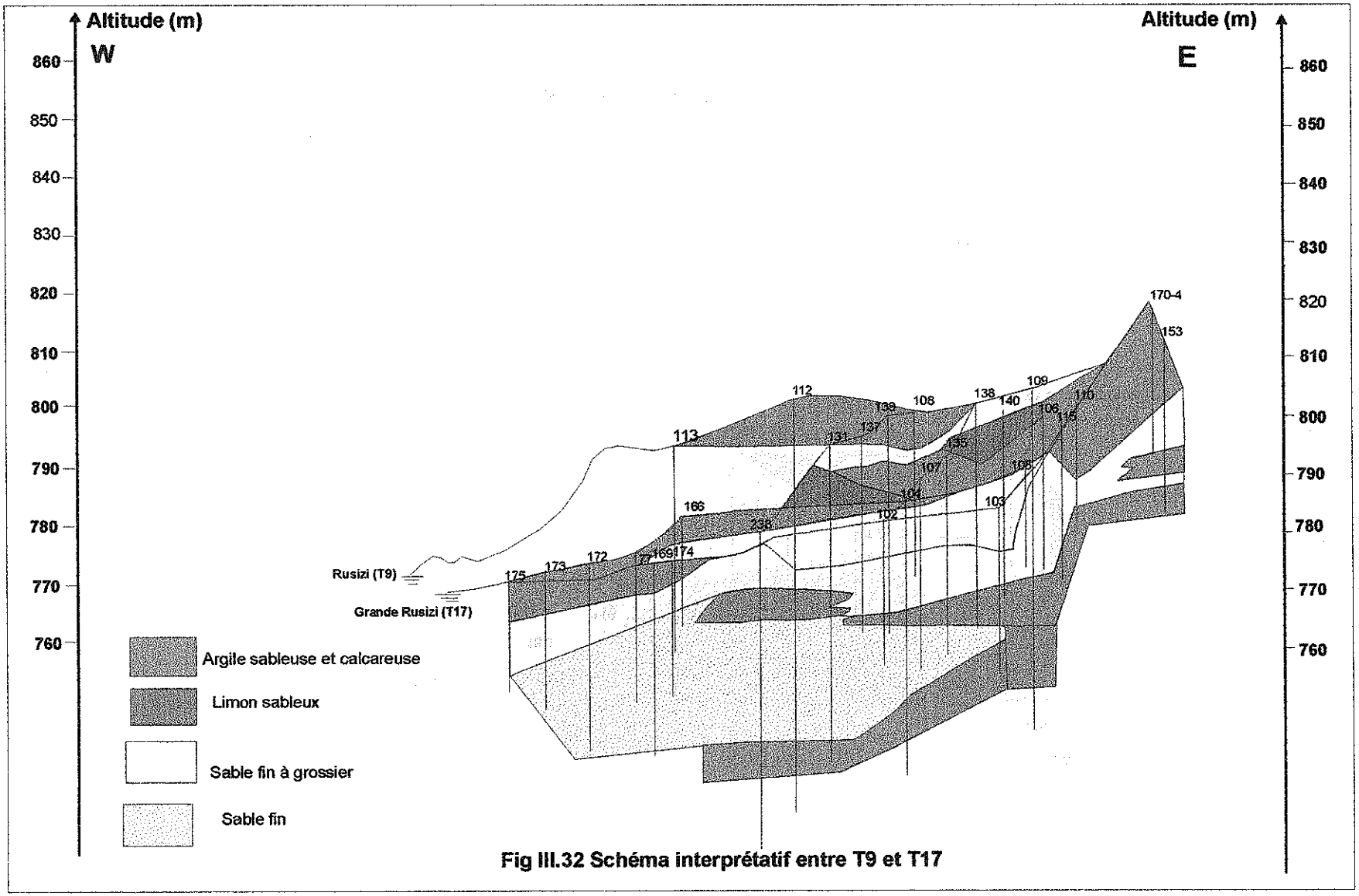


Fig III.32 Schéma interprétatif entre T9 et T17

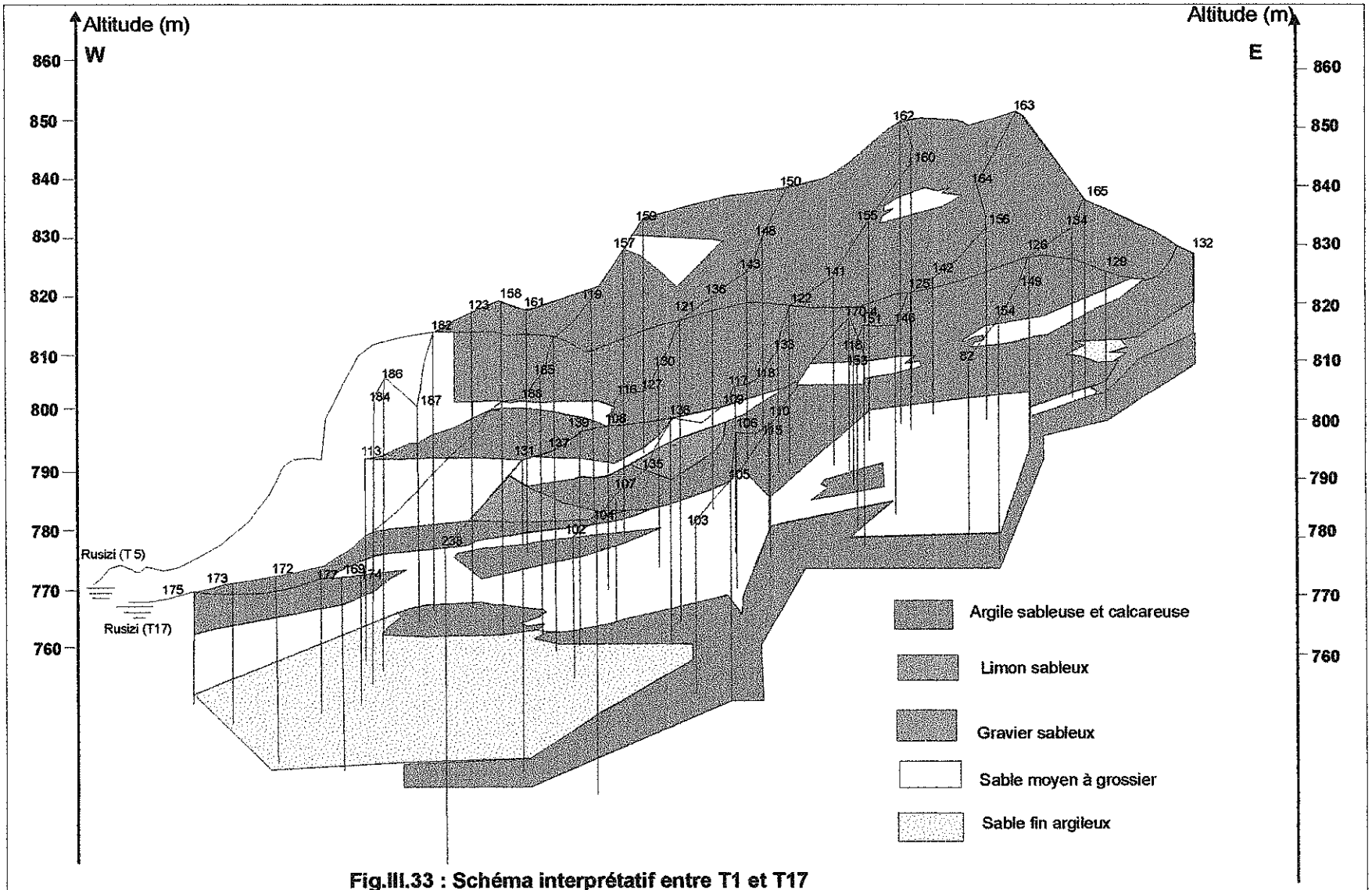
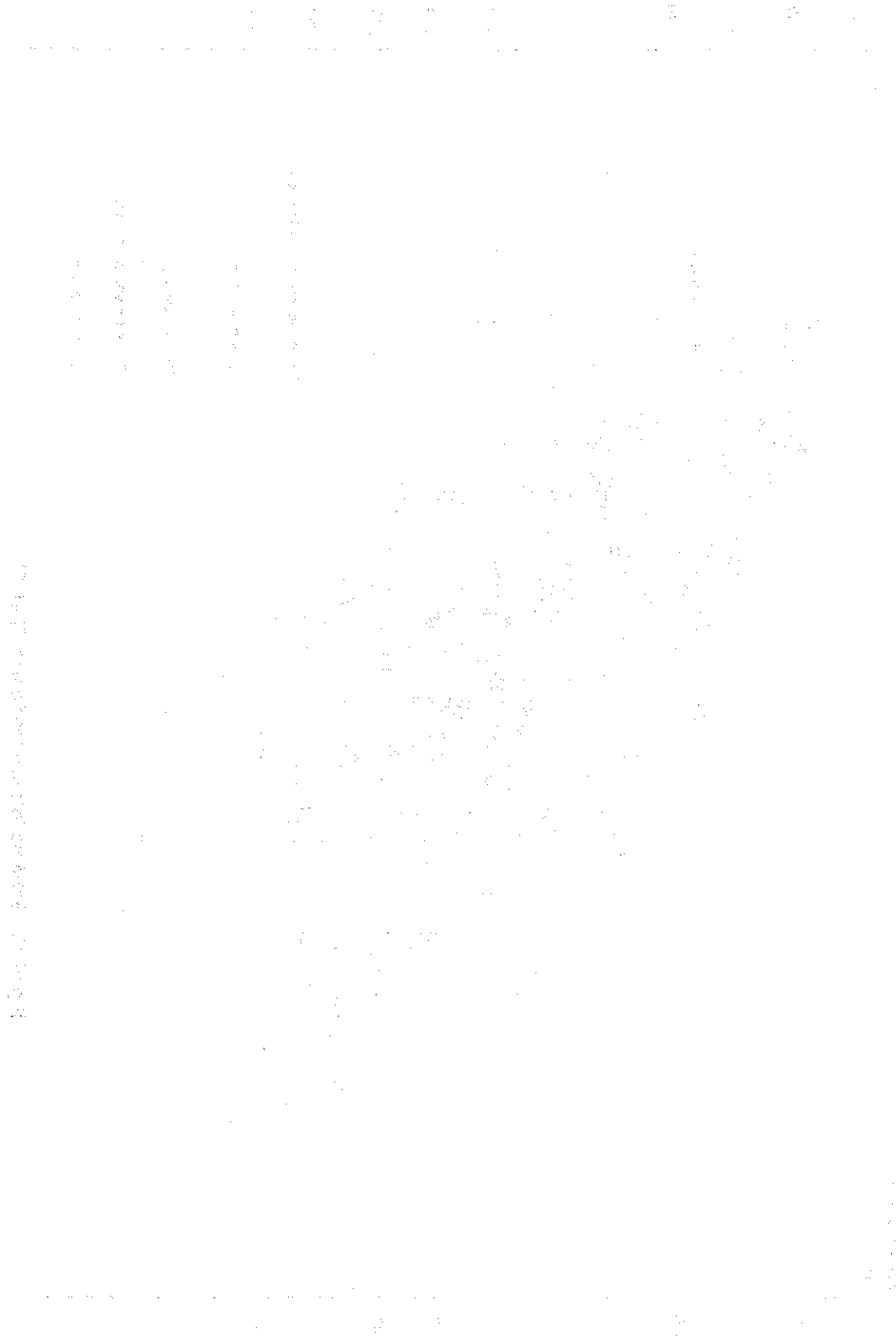


Fig.III.33 : Schéma interprétatif entre T1 et T17



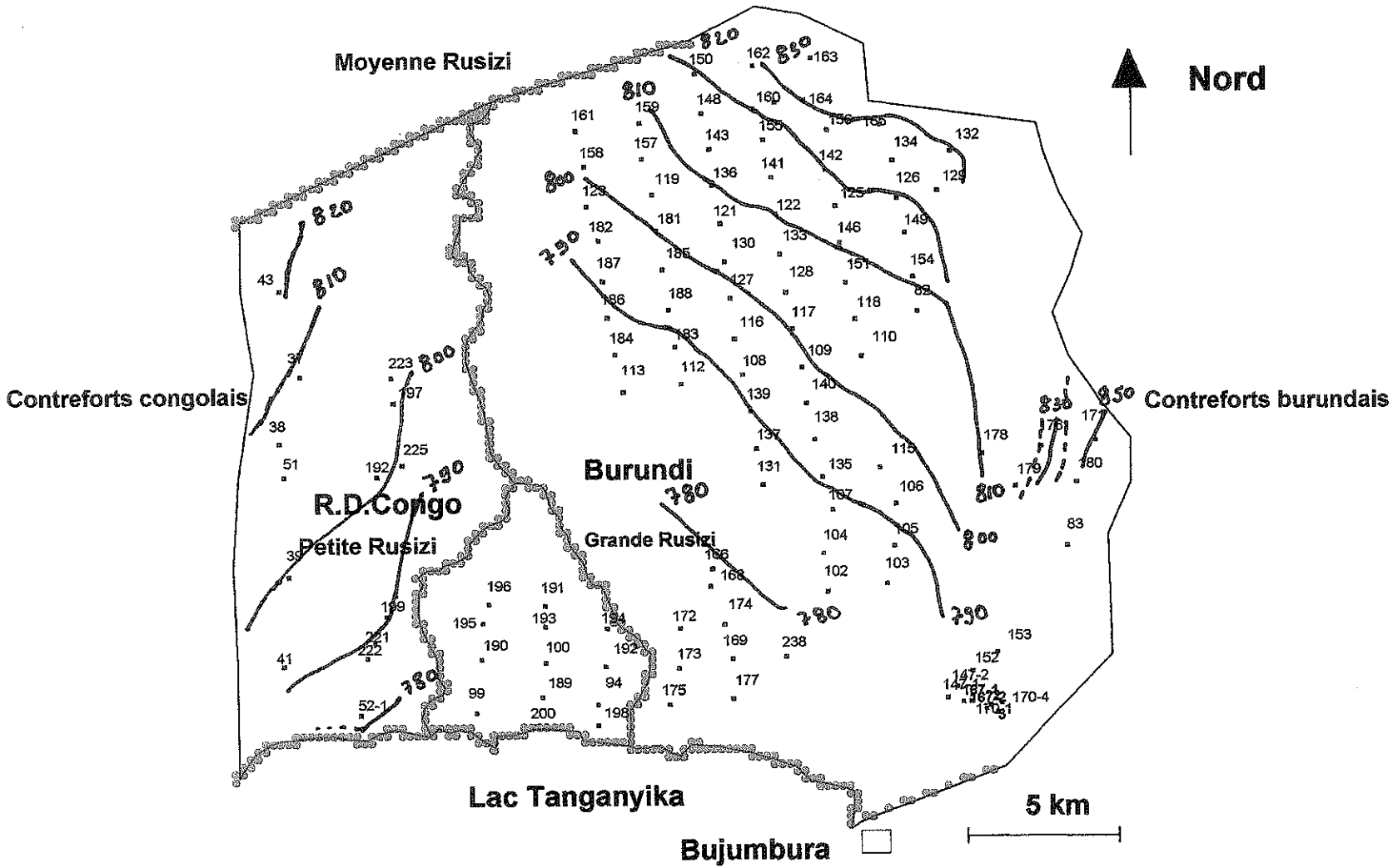


Fig.VIII.34 : Carte piézométrique de la basse Rusizi (1953-1958)

Les archives hydrologiques mentionnent deux nappes séparées par une couche argileuse aux forages Ru 102 et 103. L'épaisseur de cette couche diminue progressivement vers l'Ouest, pour disparaître dans les forages Ru 172 et 174. De ce fait, nous pensons que la deuxième nappe aquifère qui a été mise en évidence par quelques forages n'est en fait qu'une même nappe au sein de laquelle on identifie des bancs d'argiles à caractère lenticulaire qui apparaissent à certains endroits et disparaissent en d'autres.

La corrélation géologique entre les forages n'est pas certaine du point de vue strictement sédimentologique . En effet, nous n'avons pas d'arguments pour affirmer que les couches corrélées entre elles résultent d'un même épisode sédimentaire.

Dans la partie burundaise, la nappe s'écoule du NE vers le SW en direction de la rivière Rusizi (fig.III.34). Vers la SE, la nappe s'écoule en direction du lac Tanganyika. Au NE, la nappe présente un gradient de 0.4% (entre Ru 132 et Ru 177), 0.2% (entre Ru 107 et Ru 104) et 0.12% à proximité de la rivière Rusizi (entre Ru 238 et Ru 177).

Dans la partie congolaise, la nappe s'écoule du NW vers le SE, avec un gradient de 0.45% au NW (entre Ki 43 et Ki 197) et de 0.20% à proximité de la Rusizi (entre les forages Ki 39 et Ki 222).

IV. Paramètres hydrométéorologiques du bassin de la Rusizi

IV.1. Généralités

Les données hydrométéorologiques qui sont traitées dans ce travail nous ont été fournies par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU), responsable des enregistrements hydrométéorologiques du Burundi et l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), par le biais de ses centres de recherche implantés dans la région.

Nous analyserons les données de stations hydrométéorologiques localisées dans six bassins versants orientaux de la Rusizi. Le choix de ces bassins est motivé par plusieurs aspects :

- les stations sont réparties aussi bien dans la plaine que sur la crête qui constituent deux régions très différentes du point de vue climatique ;

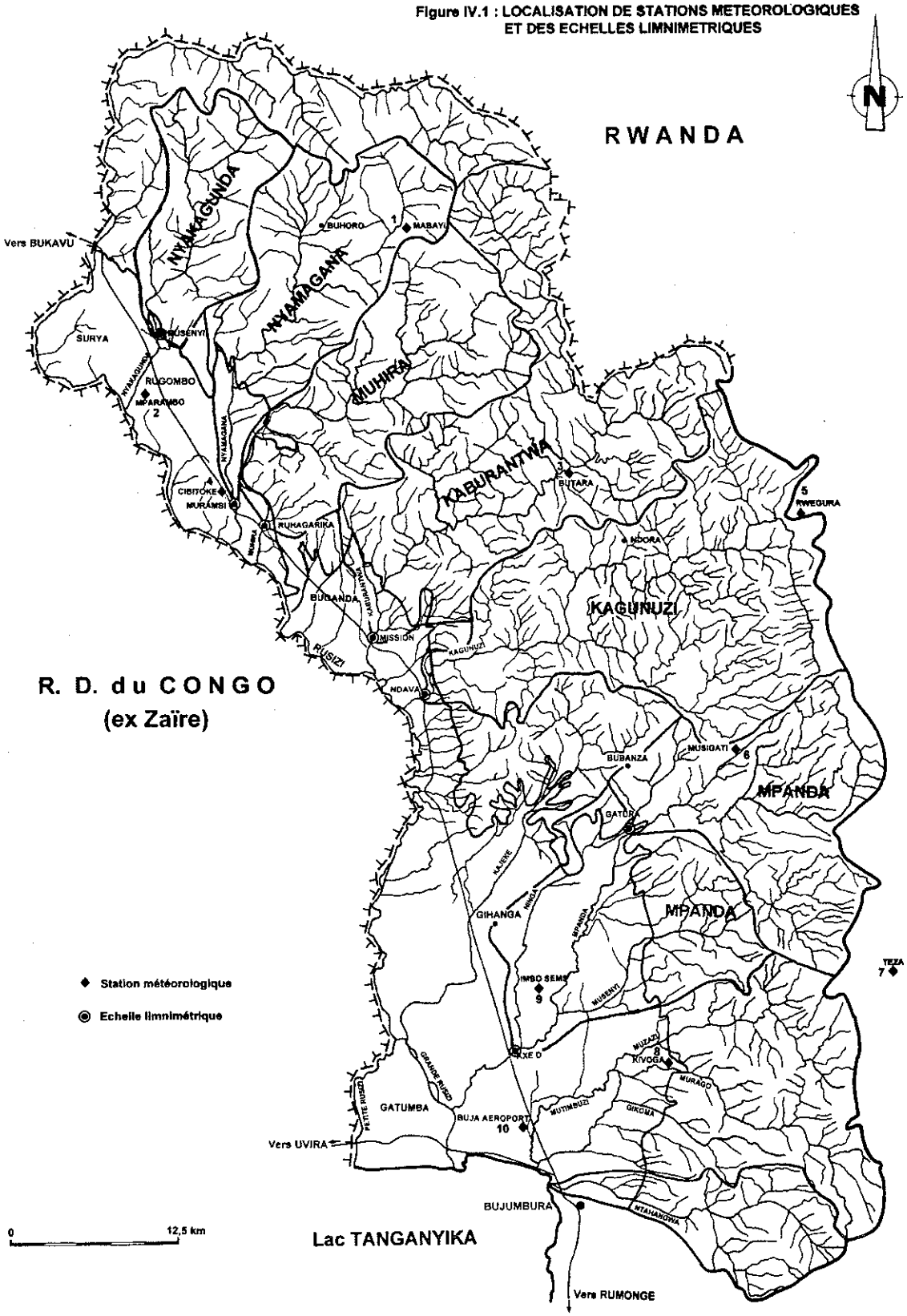
- les données enregistrées couvrent une période assez longue;

- des stations limnimétriques sont installées sur les rivières à leur entrée dans la plaine.

Nous pourrons donc réaliser les bilans hydrologiques de ces bassins et estimer la part des précipitations qui alimente les nappes de la plaine.

Du point de vue climatique, les bassins de la Rusizi occupent deux régions différentes: la plaine de la Rusizi, les contreforts et crête Congo-Nil. La figure VI.1 et le tableau 4.1 reprennent la localisation de stations météorologiques ainsi que leurs coordonnées géographiques.

Figure IV.1 : LOCALISATION DE STATIONS METEOROLOGIQUES ET DES ECHELLES LIMNIMETRIQUES



Les stations de Bujumbura aéroport, Imbo semencier, Cibitoke et Mparambo se trouvent dans la plaine, Kivoga à la limite de la plaine et des contreforts ; Mabayi, Butara et Musigati dans les contreforts ; Rwegura et Teza sur la crête Congo-Nil. Toutes ces stations fournissent les données de pluviométrie.

STATION		LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	PRECIPITATIONS	PERIODE
Bujumbura		3°19's	29°19'e	783	806	1972-1992
Imbo sems		3°11's	29°21e	820	812	1972-1992
Kivoga		3°17's	29°25'e	877	987	1972-1991
Cibitoke		2°51's	29°04'e	930	903	1972-1992
Mparambo		2°50's	29°05'e	887	937	1972-1992
Mabayi		2°42's	29°14'e	1509	2029	1972-1992
Butara		2°53's	29°20'e	1563	1900	1972-1988
Musigati		3°05's	29°27'e	1473	1664	1972-1992
Rwegura		2°55's	29°14'e	2302	1653	1972-1992
Teza		3°26's	29°36'e	2166	1589	1972-1992

Tableau 4.1 Stations météorologiques.

Les données de température ne sont fournies que par les stations de Bujumbura aéroport, Imbo semencier et Mparambo qui représentent la plaine et, Rwegura, Teza et Buhoro représentatifs des contreforts et de la crête.

Les observations supplémentaires telles que: insolation, rayonnement solaire, vent et humidité relative ne sont enregistrées que dans certaines stations dites principales et restent discontinues, couvrant rarement toute l'année.

Toutes les données des paramètres utilisés dans ce travail se trouvent en annexe. Elles sont synthétisées sous forme de tableaux et graphiques qui sont commentés dans ce chapitre.

IV.2. Données pluviométriques

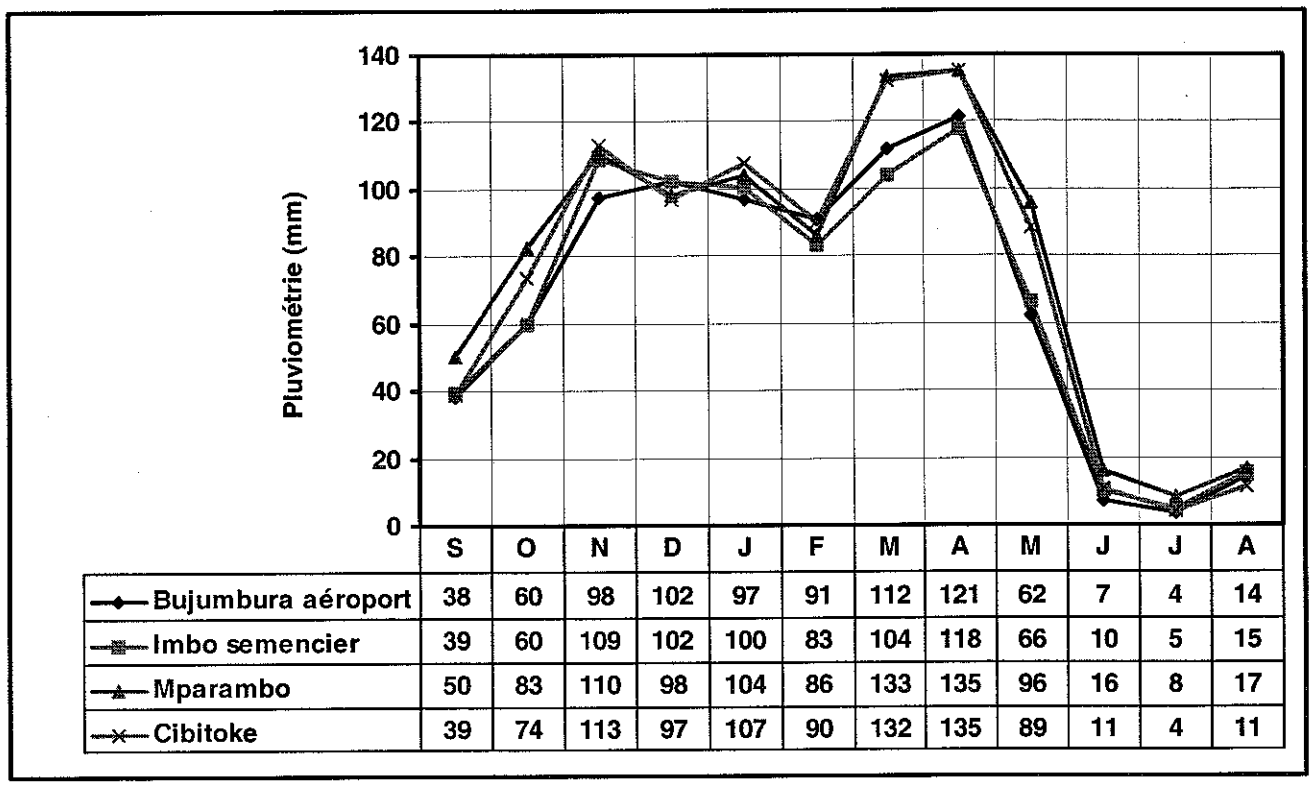
IV2.1 Plaine de la Rusizi

Dans la plaine de la basse Rusizi, les stations de Bujumbura aéroport et d'Imbo semencier enregistrent une pluviométrie moyenne annuelle de 800 mm. La pluviométrie augmente progressivement vers le Nord pour atteindre 900 à 940 mm aux stations de Cibitoke et de Mparambo localisées dans la plaine de la moyenne Rusizi .

Le tableau 4.2 et la fig.IV.2 montrent la variation de la pluviométrie au cours d'une année moyenne.

	Bujumbura aéroport	Imbo semencier	Cibitoke	Mparambo
S	38.4	39.3	38.8	50.0
O	59.7	59.8	73.5	82.5
N	97.5	108.6	113.3	110.4
D	102.1	102.1	96.7	97.9
J	96.7	100.4	107.5	104.2
F	91.0	83.0	90.4	86.1
M	111.6	104.4	132.3	133.2
A	121.4	117.8	135.5	135.3
M	62.2	66.4	88.6	96.0
J	7.3	10.2	11.0	16.1
J	3.6	4.5	4.1	8.3
A	14.2	15.3	11.4	16.8
Total	**806**	**812**	**903**	**937**

Tableau 4.2 : Pluviométrie moyenne mensuelle de la plaine (1972-1992).



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Bujumbura aéroport	38	60	98	102	97	91	112	121	62	7	4	14
Imbo semencier	39	60	109	102	100	83	104	118	66	10	5	15
Mparambo	50	83	110	98	104	86	133	135	96	16	8	17
Cibitoke	39	74	113	97	107	90	132	135	89	11	4	11

Fig.IV.2 : Variation mensuelle de la pluviométrie dans la plaine au cours d'une année moyenne 1972-1992.

On observe que, de juin à septembre, la basse plaine enregistre une pluviométrie inférieure à 50 mm. C'est la période de la saison sèche qui débute souvent en mai pour se terminer fin septembre, ces deux mois constituant la transition entre saison sèche et saison de pluie.

La période du début des précipitations n'étant pas constante, le mois d'octobre peut être également touché par la saison sèche. A Bujumbura aéroport par exemple, les années hydrologiques 74-75, 75-76, 77-78, 78-79, 79-80 85-86 et 87-88 ont enregistré une pluviométrie inférieure à 40 mm pendant le mois d'octobre (Annexe II.1).

Dans la plaine de la moyenne Rusizi, la durée de la saison sèche est plus courte. A la station de Mparambo par exemple, les mois de transition (mai et septembre) reçoivent assez régulièrement des précipitations (Annexe II.1).

Le régime des précipitations présente des variations importantes d'une année à l'autre . Le rapport des précipitations extrêmes annelles durant la période 1972-1992 varie de 1.7 à 2.

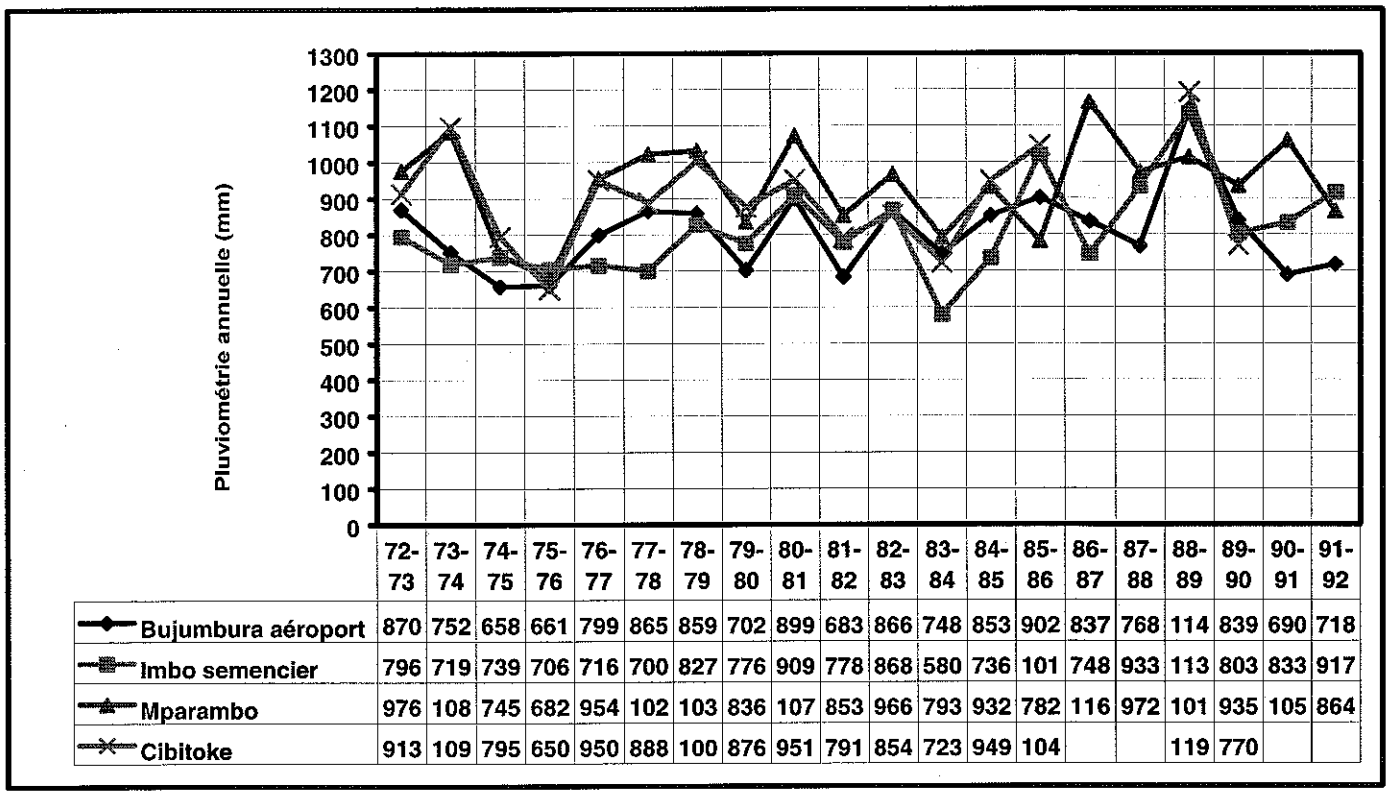
Année		72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
Buja		870	752	658	661	799	865	859	702	899	683	866	748	853	902	837	768	1145	839	690	718
Imbo		796	719	739	706	716	700	827	776	909	778	868	580	736	1019	748	933	1133	803	833	917
Mparambo		976	1084	745	682	954	1022	1032	836	1072	853	966	793	932	782	1165	972	1013	935	1059	864
Cibitoke		913	1097	795	650	950	888	1002	876	951	791	854	723	949	1044	*	*	1192	770	*	*

Tableau 4.3 : Pluviométrie annuelle (en mm) de la plaine (1972-1992).

Suivant la hauteur de pluie tombée mensuellement au cours de l'année, on peut définir le type de climat d'une région. Ainsi, la basse plaine de la Rusizi appartient au type climatique $(AW_5)S$, la moyenne plaine appartenant à AW_4S .

D'après la classification de Köppen, la classe A comprend les régions où la cote udométrique du mois le plus sec descend en dessous de 60 mm.

L'indice W signifie que la saison sèche a lieu pendant l'hiver de l'hémisphère dans lequel on se trouve. Le chiffre en indice indique le nombre de mois de saison sèche et S l'hémisphère dans lequel on se trouve, dans notre cas l'hémisphère Sud.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
Bujumbura aéroport	870	752	658	661	799	865	859	702	899	683	866	748	853	902	837	768	114	839	690	718
Imbo semencier	796	719	739	706	716	700	827	776	909	778	868	580	736	101	748	933	113	803	833	917
Mparambo	976	108	745	682	954	102	103	836	107	853	966	793	932	782	116	972	101	935	105	864
Cibitoke	913	109	795	650	950	888	100	876	951	791	854	723	949	104			119	770		

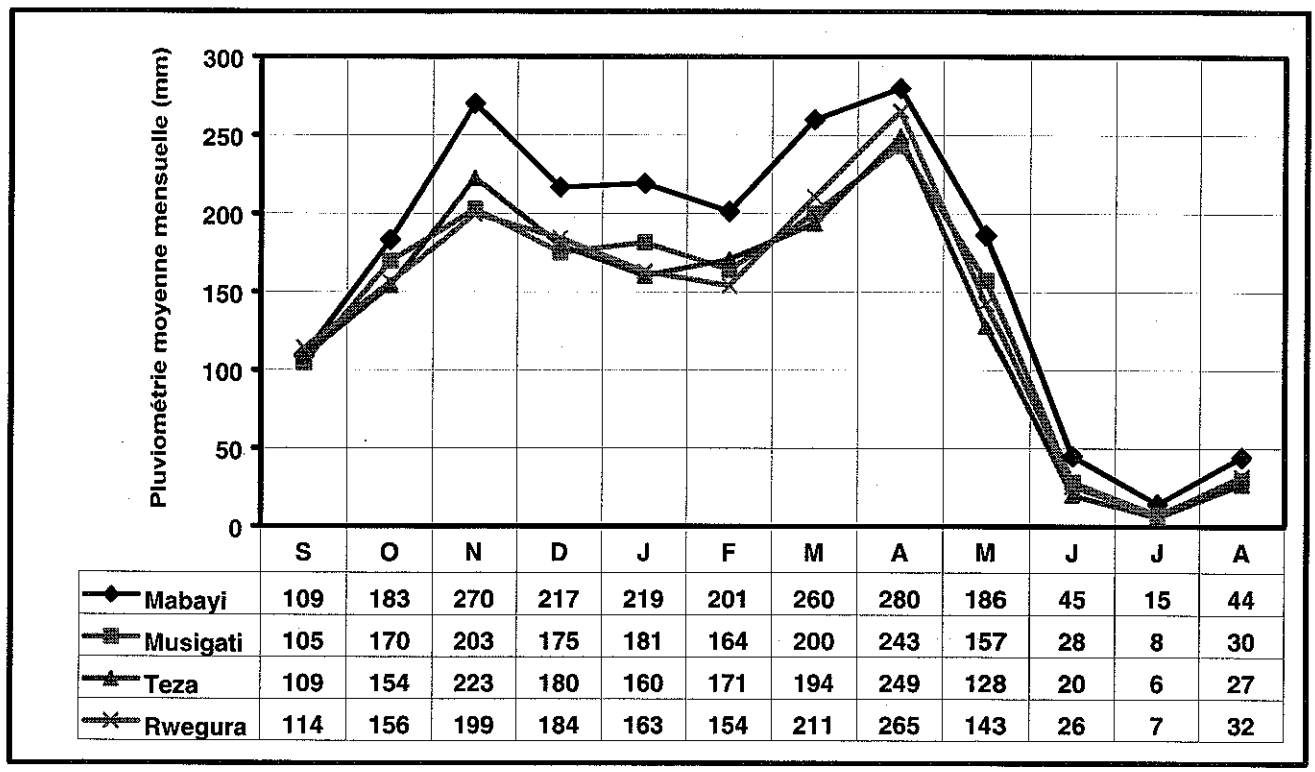
Fig. IV.3 : Variation de la pluviométrie annuelle entre 1972 et 1992.

Comme nous l'avons signalé précédemment, pendant certaines années, la saison sèche s'étend sur six mois. C'est le cas pour la station de Bujumbura aéroport où les années 73-74, 74-75, 76-77, 77-78, 80-81, 83-84 et 84-85 ont vu la saison sèche s'étendre de mai à octobre. L'indice de Köppen augmente d'une unité et le type climatique est symbolisé par $(AW_6)S$.

Les mêmes remarques sont valables pour la moyenne plaine (Mparambo) pour l' année 83-84, le climat passe de AW_4S à (AW_5S).

IV.2.2. Contreforts et crête Congo-Nil

Dans les contreforts et sur la crête, la saison sèche ne dure que trois mois (de juin à août), les mois de mai et septembre enregistrant des précipitations supérieures à 100 mm comme le montre la fig.IV.4. Entre les mois de novembre et avril, toutes les stations enregistrent une pluviométrie moyenne mensuelle supérieure à 150 m, avec des maxima aux mois de novembre et avril.



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Mabayi	109	183	270	217	219	201	260	280	186	45	15	44
Musigati	105	170	203	175	181	164	200	243	157	28	8	30
Teza	109	154	223	180	160	171	194	249	128	20	6	27
Rwegura	114	156	199	184	163	154	211	265	143	26	7	32

Fig.IV.4 : Variation moyenne mensuelle de la pluviométrie dans les contreforts et la crête Congo-Nil, période (1972-1992).

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 1600 à 2000 mm. Au tableau 4.4, l'on observe que les stations de Mabayi et de Musigati, situées aux environs de 1500 m d'altitude, enregistrent des précipitations plus élevées que celles de Rwegura et Teza qui se trouvent à plus de 2000 m d'altitude. Dans les contreforts, les conditions locales de pluviogénèse deviennent plus importantes que le facteur altitude.

Casenave, (1973) a expliqué cette pluviométrie des contreforts: «dans cette zone, l'air ascendant de la plaine entre en contact avec les masses d'air de l'alizé qui viennent de franchir la crête, ou, parfois avec la mousson atlantique venue de l'Ouest. Le refroidissement de l'air de la plaine s'accentue, l'affaissement de l'alizé venant de l'océan indien est bloqué, la confluence des masses d'air au dessus des contreforts, génératrice de grains, est favorable à la condensation de l'humidité. D'énormes nuages se forment et les abats d'eau sont importants ».

Année	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92	Moy
Mabayi	1926	2395	1445	1537	1597	1680	1758	2173	1863	1960	2128	1999	1935	2052	2313	2850	2114	2528	2244	2080	**2029**
Musigati	1716	2449	1588	1413	1670	1947	1507	1577	1783	1515	1946	1357	1745	1605	1732	1885	1626	1408	1463	1345	**1664**
Teza	1590	1840	1392	1448	1618	1751	1811	1482	1709	1606	1642	1435	1677	1702	1751	1902	1683	1394	1513	1436	**1619**
Rwegura	1824	1718	1324	1519	1531	1733	1814	1333	1485	1616	1724	1521	1612	1706	1689	2161	1827	1457	1927	1546	**1653**

Tableau 4.4 : Pluviométrie annuelle (mm) dans les contreforts et la crête.

IV.2.3. Régime pluviométrique du bassin de la Rusizi

Au cours de l'année hydrologique, le régime pluviométrique peut être divisé en deux saisons: une saison sèche qui commence à la mi-mai et se termine en septembre et une saison de pluie qui s'étale d'octobre à mai avec un minimum secondaire en février appelé souvent à tort "petite saison sèche". Ce minimum apparaît aussi bien dans la plaine que sur les contreforts et la crête.

Selon la classification de Pignol (SHER,1987) , un mois sec est un mois dont la pluviométrie est inférieure à 60 mm; or, au mois de février, toutes les stations considérées enregistrent des précipitations mensuelles moyennes supérieures à 80 mm. Cependant, cette observation n'est valable que pour une année moyenne car, l'irrégularité de la pluviométrie dans la plaine fait que certaines années enregistrent des précipitations inférieures à 60 mm.

De Martonne (SHER,1987) lui, considère comme mois sec un mois dont l'indice d'aridité mensuel ne dépasse pas 20, ces indices étant définis par la formule:

$I_m = \frac{P_m \times 12}{T_m + 10}$ où P_m et T_m sont respectivement la hauteur moyenne mensuelle des pluies exprimée en mm et la température exprimée en degrés centigrades.

Les indices d'aridité déterminés aux stations de Bujumbura aéroport et Rwegura, qui représentent respectivement la plaine et la crête, figurent au tableau 4.5. Les résultats montrent que le mois de février, avec des indices compris entre 33 et 70, est un mois humide.

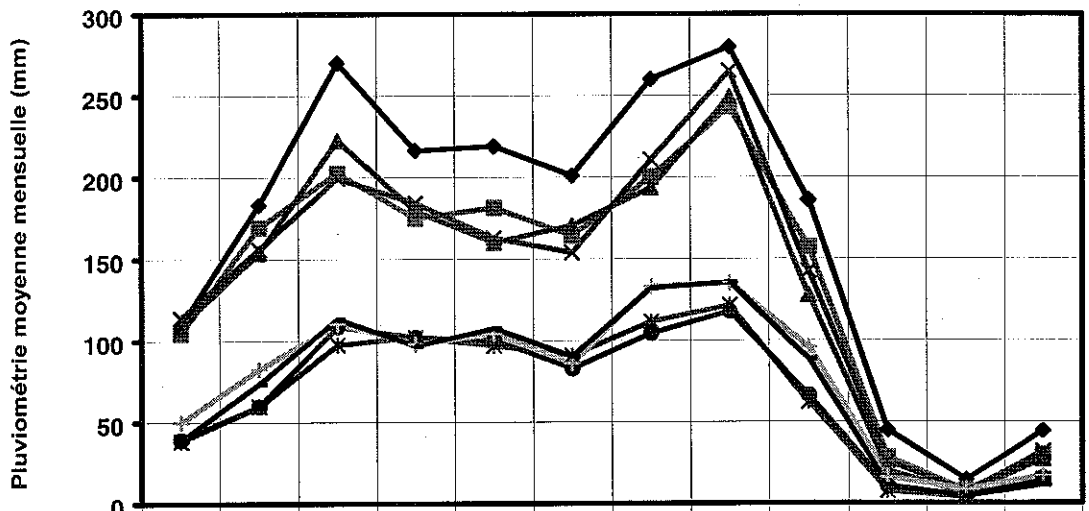
En considérant le critère de De Martonne , on remarque que, dans la plaine, la saison sèche dure de juin à septembre. Les mois de mai et octobre peuvent également basculer dans la saison sèche, parce que leurs indices d'aridité oscillent autour de l'indice d'aridité égal à 20. Sur la crête, la saison sèche ne couvre que les mois de juin , juillet et août.

	Bujumbura aéroport			Rwegura		
	Pluviométrie (mm)	Température °c	Indice d'aridité	Pluviométrie (mm)	Température °c	Indice d'aridité
S	38	24.2	**13.5**	114	16.2	**52.2**
O	60	24.3	**20.9**	156	16.1	**71.6**
N	98	24.3	**34.1**	199	15.8	**92.9**
D	102	24.4	**35.6**	184	15.8	**85.7**
J	97	24.2	**33.9**	163	16.1	**75.0**
F	**91**	23.5	**32.6**	**154**	16.2	**70.4**
M	112	22.8	**40.8**	211	16.2	**96.6**
A	121	23.7	**43.2**	265	15.8	**123.3**
M	62	24.6	**21.6**	143	15.4	**67.2**
J	7	24.7	**2.5**	26	15.1	**12.3**
J	4	24.0	**1.3**	7	15.0	**3.4**
A	14	24.0	**5.0**	32	15.9	**14.7**

Tableau 4.5 : Indices d'aridité mensuelle aux stations de Bujumbura aéroport et Rwegura (1972-1992).

La variation temporelle et spatiale de la pluviométrie du bassin supérieur et de la plaine est illustrée à la fig. IV.5. Les précipitations les plus élevées ont lieu durant les mois de mars et avril; ces mois reçoivent plus de 25% des précipitations moyennes annuelles. Ils correspondent au passage du front de convergence entre l'alizé de l'hémisphère Nord dévié vers le Sud au passage à l'équateur et les masses d'air de l'alizé de l'hémisphère Sud venant de l'Ouest de l'océan indien (Casenave,1979).

Les mois de juin, juillet et août totalisent moins de 5% de la pluviométrie moyenne annuelle. Ces trois mois enregistrent une pluie dérisoire, tantôt n'en enregistrent pas du tout.



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Mabayi	109	183	270	217	219	201	260	280	186	45	15	44
Musigati	105	170	203	175	181	164	200	243	157	28	8	30
Teza	109	154	223	180	160	171	194	249	128	20	6	27
Rwegura	114	156	199	184	163	154	211	265	143	26	7	32
Bujumbura aéroport	38	60	98	102	97	91	112	121	62	7	4	14
Imbo semencier	39	60	109	102	100	83	104	118	66	10	5	15
Mparambo	50	83	110	98	104	86	133	135	96	16	8	17
Cibitoke	39	74	113	97	107	90	132	135	89	11	4	11

Fig.IV.5 : Variation de la pluviométrie dans le bassin de la Rusizi.

IV.3. Températures

Dans la plaine, les données de température sont enregistrées aux stations climatologiques de Bujumbura-aéroport, Imbo semencier et Mparambo. La station de Buhoro située à 1307 m d'altitude enregistre des températures intermédiaires entre la plaine et la crête. Les stations de Rwegura et Teza fournissent la thermométrie de la partie supérieure du bassin.

IV.3.1. Plaine de la Rusizi

Les températures minimales, maximales et moyennes mensuelles de stations de Bujumbura aéroport, Imbo semencier et Mparambo sont reprises en annexe III.1. Le tableau 4.6 fournit les températures mensuelles moyennes, moyennes maximales et minimales pour ces trois stations de la plaine, pendant la période 1972-1992.

	BUJA	IMBO	MPARA		BUJA	IMBO	MPARA		BUJA	IMBO	MPARA
	min	min	min		max	max	max		moy	moy	moy
J	19.2	18.6	17.5		29.2	29.8	30.7		24.2	24.1	24.1
F	19.1	18.4	17.6		29.5	30.0	31.0		24.3	24.3	24.2
M	19.2	18.6	17.7		29.3	30.0	31.0		24.3	24.3	24.4
A	19.6	19.0	18.3		29.1	29.7	30.9		24.4	24.4	24.4
M	19.1	18.6	18.0		29.3	29.9	30.6		24.2	24.2	24.3
J	17.6	17.2	16.5		29.3	30.1	31.0		23.5	23.7	23.6
J	16.4	16.0	14.3		29.1	30.1	31.4		**22.8**	**22.8**	**23.2**
A	17.4	16.3	15.1		30.0	31.0	32.5		23.7	23.8	23.8
S	18.5	17.5	16.7		30.7	31.7	33.2		24.6	24.9	24.6
O	19.1	18.3	17.6		30.3	31.2	32.2		**24.7**	**25.0**	**24.8**
N	19.1	18.2	17.6		28.8	29.9	31.1		24.0	24.4	24.1
D	19.1	18.2	17.6		28.8	29.4	31.0		24.0	24.3	23.9
Moyenne	18.6	17.9	17.0		29.4	30.2	31.4		24.1	24.2	24.1

Tableau 4.6 :Températures minimales maximales et moyennes (1972- 1992).

Le tableau montre que :

- la température moyenne annuelle est comprise entre 24.1 et 24.2°C ;
- la moyenne annuelle des températures minimales varie de 17 à 18.6°C;
- la moyenne annuelle des températures maximales se situe entre 29.4 et 31.4°C ;
- la plaine de la basse Rusizi (station de Bujumbura aéroport) enregistre des températures maximales moins élevées que celle de la moyenne Rusizi (station de Mparambo). Cela est dû à sa proximité par rapport au lac Tanganyika ; les brises du lac soufflant du lac vers la terre pendant la journée jouent un rôle de modérateur dans cette partie de la plaine.

Les variations de température au cours de l'année sont minimes (fig.IV.6). Les températures moyennes les plus élevées sont enregistrées en octobre (entre 24.7 et 25°c) , les plus basses en juillet (entre 22.8 et 23.2°c).

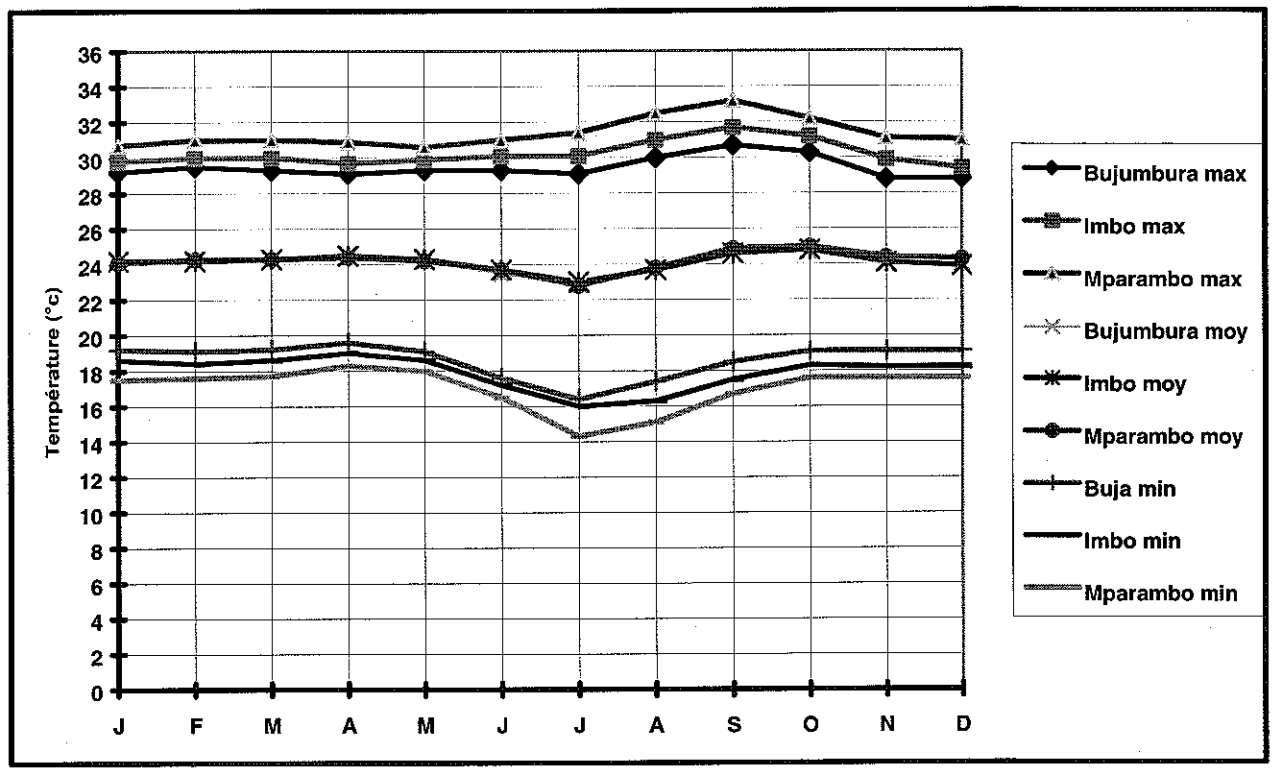


Fig. IV.6. Variation des températures maximales, minimales et moyennes dans la plaine au cours d'une année moyenne (période 1972 - 1992).

Les températures maximales moyennes enregistrées dans la moyenne Rusizi (station de Mparambo) sont légèrement supérieures à celles de la basse Rusizi (station de Bujumbura et Imbo semencier) et inversement en ce qui concerne les températures minimales moyennes.

IV.3.2. Contreforts et crête

Les températures minimales, maximales et moyennes mensuelles des contreforts et de la crête sont reprises en annexe III.2 et III.3. Les contreforts représentés par la station de Buhoro, enregistre les températures moyennes suivantes (tableau 4.7) :

- température moyenne annuelle: 19.9°C;
- température minimale moyenne annuelle: 12.5°C ;
- température maximale moyenne annuelle: 27.3° C;

La variation des températures d'un mois à l'autre est peu marquée (fig.IV.7). La température moyenne mensuelle est légèrement plus élevée pendant la saison de pluie (entre septembre et mai).

Mois	Buhoro min	Rwegura min	Teza min		Buhoro Max	Rwegura Max	Teza Max		Buhoro Moy	Rwegura Moy	Teza Moy
	76-92	72-92	72-92		76-92	72-92	72-92		76-92	72-92	72-92
J	13.8	11.5	11.0		27.0	20.5	21.1		20.4	16.1	16.1
F	13.5	11.7	11.1		27.2	20.7	21.3		20.3	16.2	16.2
M	13.4	11.8	11.1		27.1	20.5	21.4		20.3	16.2	16.2
A	14.2	11.8	11.9		26.8	19.7	20.6		20.5	15.8	16.3
M	13.7	11.6	11.6		26.7	19.2	20.2		20.2	15.4	15.9
J	11.1	10.9	9.9		27.1	19.3	20.2		19.1	15.1	15.1
J	9.4	10.6	8.8		27.5	19.4	20.6		18.4	15.0	14.8
A	10.2	11.3	9.8		28.5	20.6	21.8		19.4	15.9	15.8
S	11.7	11.5	10.4		28.7	20.9	22.4		20.2	16.2	16.4
O	12.5	11.7	11.0		27.9	20.6	22.0		20.2	16.2	16.5
N	13.4	11.5	11.1		26.9	20	20.9		20.2	15.8	16.0
D	13.7	11.4	10.8		26.9	20.1	21.1		20.3	15.8	16.0
Moyenne	**12.5**	**11.4**	**10.7**		**27.3**	**20.1**	**21.1**		**19.9**	**15.8**	**15.9**

Tableau 4.7 : Températures des contreforts et de la crête.

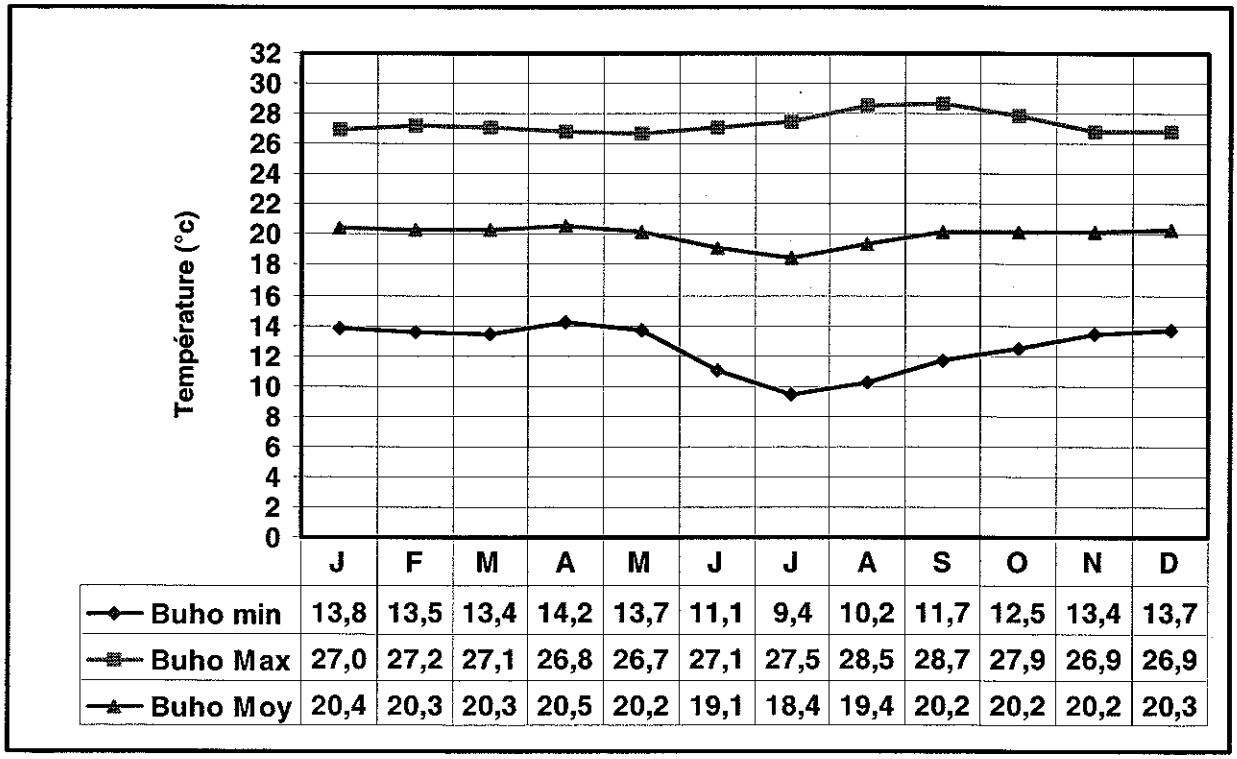
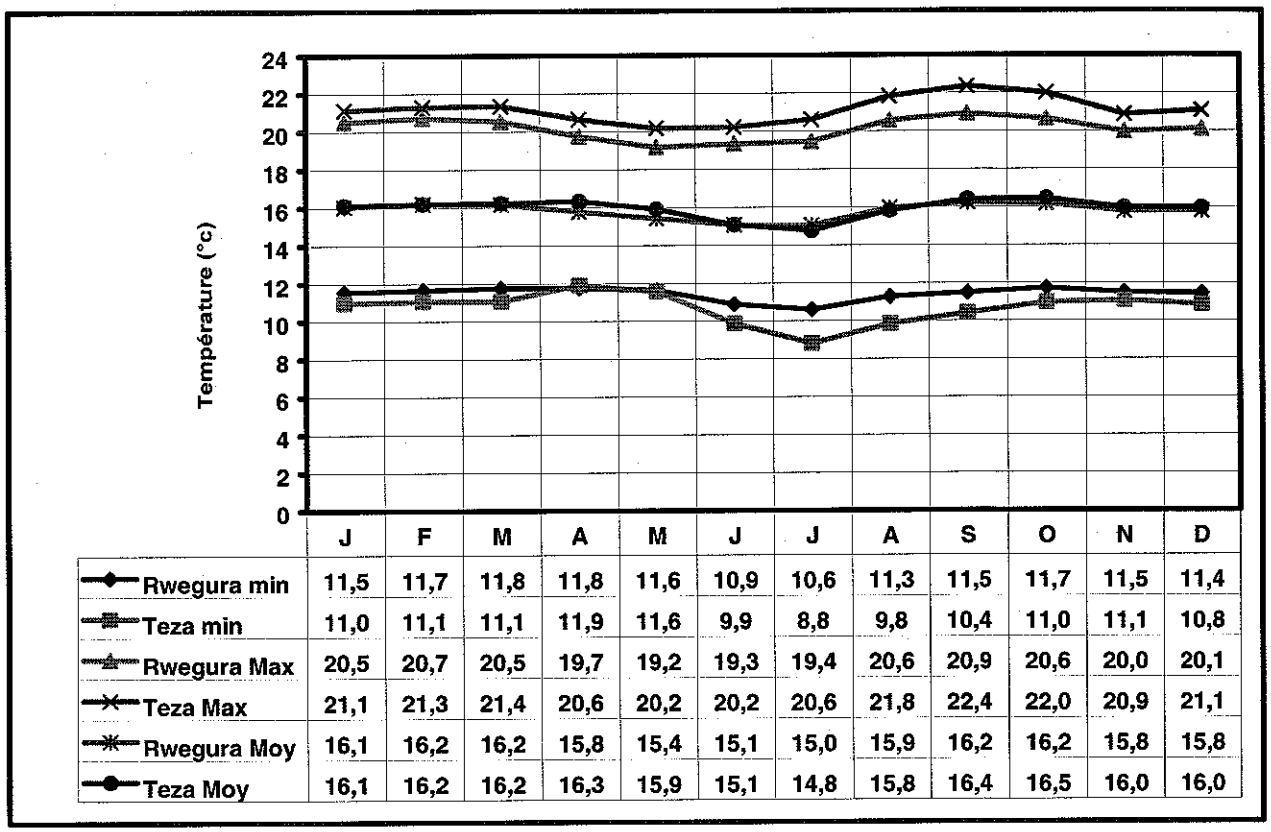


Fig. IV.7. Variation des températures maximales, minimales et moyennes dans les contreforts au cours d'une année moyenne (période 1976 - 1992).

Dans la crête Congo-Nil, les stations de Rwegura et de Teza enregistrent les valeurs suivantes:

- température moyenne annuelle: 15.9°C;
- température minimale moyenne annuelle: 10.7°C;
- température maximale moyenne annuelle: 21.1°C ;



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rwegura min	11,5	11,7	11,8	11,8	11,6	10,9	10,6	11,3	11,5	11,7	11,5	11,4
Teza min	11,0	11,1	11,1	11,9	11,6	9,9	8,8	9,8	10,4	11,0	11,1	10,8
Rwegura Max	20,5	20,7	20,5	19,7	19,2	19,3	19,4	20,6	20,9	20,6	20,0	20,1
Teza Max	21,1	21,3	21,4	20,6	20,2	20,2	20,6	21,8	22,4	22,0	20,9	21,1
Rwegura Moy	16,1	16,2	16,2	15,8	15,4	15,1	15,0	15,9	16,2	16,2	15,8	15,8
Teza Moy	16,1	16,2	16,2	16,3	15,9	15,1	14,8	15,8	16,4	16,5	16,0	16,0

Fig. IV.8 : Variation des températures maximales, minimales et moyennes de la crête Congo-Nil : année moyenne 1972-1992.

Au mois de juillet (le mois le plus froid), la température minimale moyenne mensuelle est inférieure à 10°c à la station de Teza , cette station enregistre également la température maximale moyenne (22.4°c) au mois de septembre.

La fig.IV.9 reprend les températures moyennes mensuelles des trois zones étudiées et illustre clairement la diminution de la température au fur et à mesure qu'augmente l'altitude.

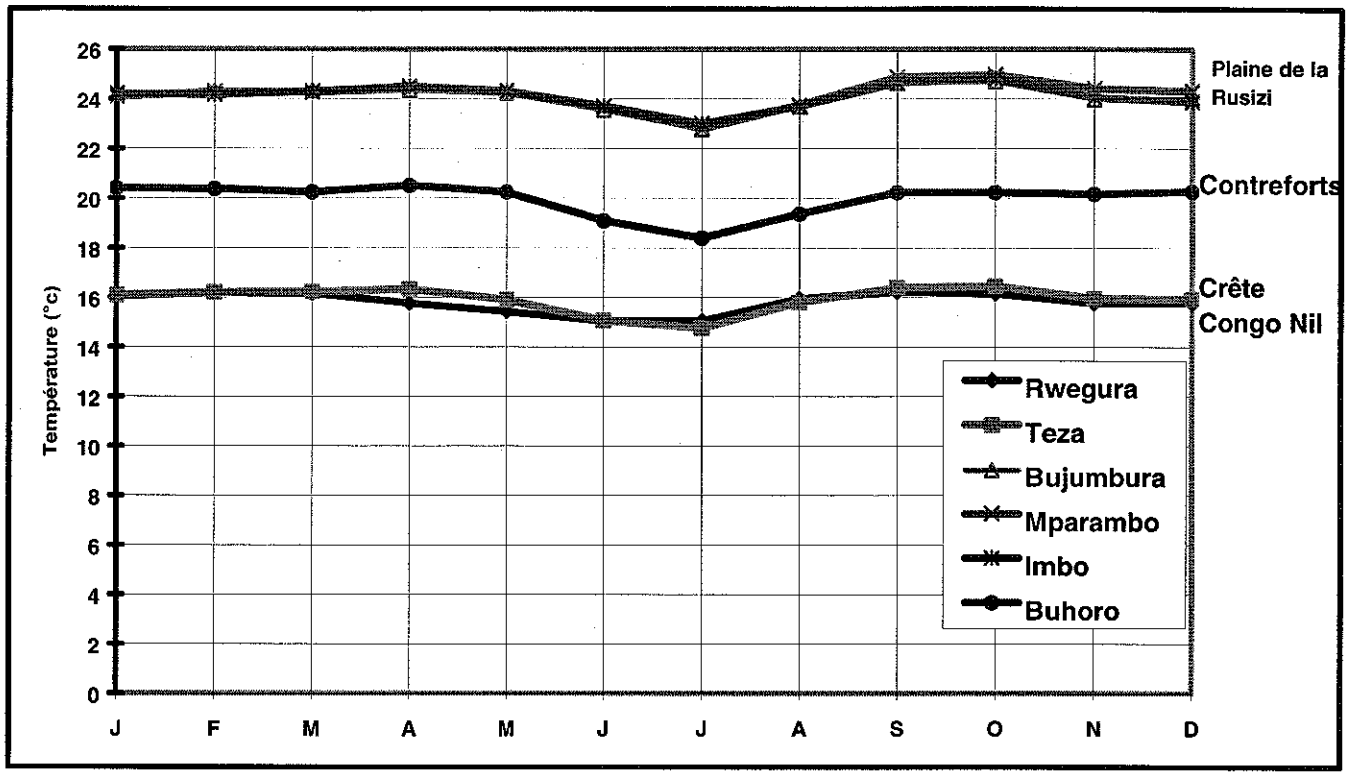


Fig.IV.9 : Variation spatiale de la température moyenne mensuelle du bassin de la Rusizi.

IV.4. Humidité relative

Les données mensuelles d'humidité relative recueillies aux stations de Rwegura (crête) et Imbo semencier (plaine), qui représentent les deux régions du bassin, se trouvent au tableau 4.8. Ces données ne couvrent qu'une période de 6 ans.

On remarque que l'humidité est plus élevée dans la partie supérieure du bassin que dans la plaine. Cela résulte de leur situation métrique différente, mais également de la couverture végétale et d'une fréquence plus grande des nuages au dessus de la crête. La station de Rwegura, située à plus de 2000 m d'altitude, enregistre plus de 80% d'humidité relative pendant 7 mois consécutifs (de novembre à mai). Au cours de l'année, l'humidité est moins élevée pendant la saison sèche (juin - septembre) que le reste de l'année (fig.IV.10).

RWEGURA									IMBO SEMENCIER							
	87	88	89	90	91	92	Moyenne			87	88	89	90	91	92	Moyenne
										*	*					
J	82	83	78	78	78	86	**81**		J	78	*	81	74	73	76	**76**
F	77	82	87	82	75	87	**82**		F	89	*	79	75	74	78	**79**
M	77	88	89	82	80	85	**84**		M	83	*	82	76	76	78	**79**
A	78	88	84	84	84	86	**84**		A	76	76	79	75	76	76	**76**
M	78	88	86	84	88	85	**85**		M	81	76	78	75	77	75	**77**
J	65	77	85	82	79	80	**78**		J	72	65	68	69	73	73	**70**
J	54	78	80	74	72	75	**72**		J	65	63	65	67	69	68	**66**
A	51	79	76	62	68	68	**67**		A	62	67	62	63	66	61	**64**
S	64	87	67	71	63	72	**71**		S	72	67	63	66	64	61	**66**
O	71	85	77	72	82	82	**78**		O	74	74	71	68	74	69	**72**
N	80	88	87	80	88	83	**84**		N	79	78	72	72	77	88	**78**
D	73	88	85	83	86	85	**83**		D		81	83	71	78	75	**78**

* : données incomplètes

Tableau 4.8 : Humidité relative enregistrée à Rwegura et Imbo semencier (période 1987 - 1992).

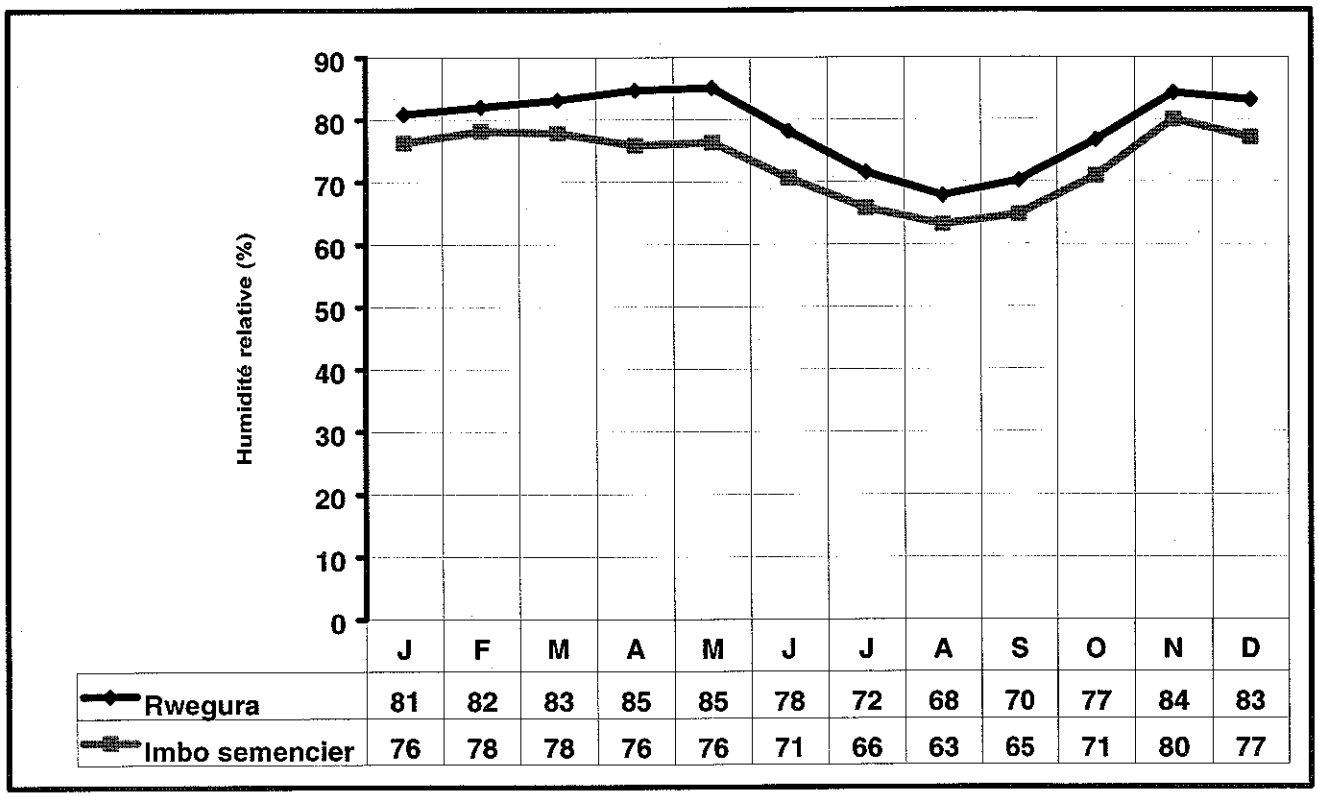


Fig. IV.10 : Variation de l'humidité relative au cours de l'année aux stations de Rwegura et Imbo semencier.

IV.5. Insolation

L'insolation, qui dépend directement de la couverture nuageuse, est nettement plus élevée dans la plaine que sur la crête. L'insolation annuelle à la station de l'Imbo semencier située dans la plaine de la basse Rusizi est comprise entre 2200 et 2500 heures par an. Elle descend souvent en dessous de 2000 heures/an à Rwegura, sur la crête Congo-Nil (fig.IV.11).

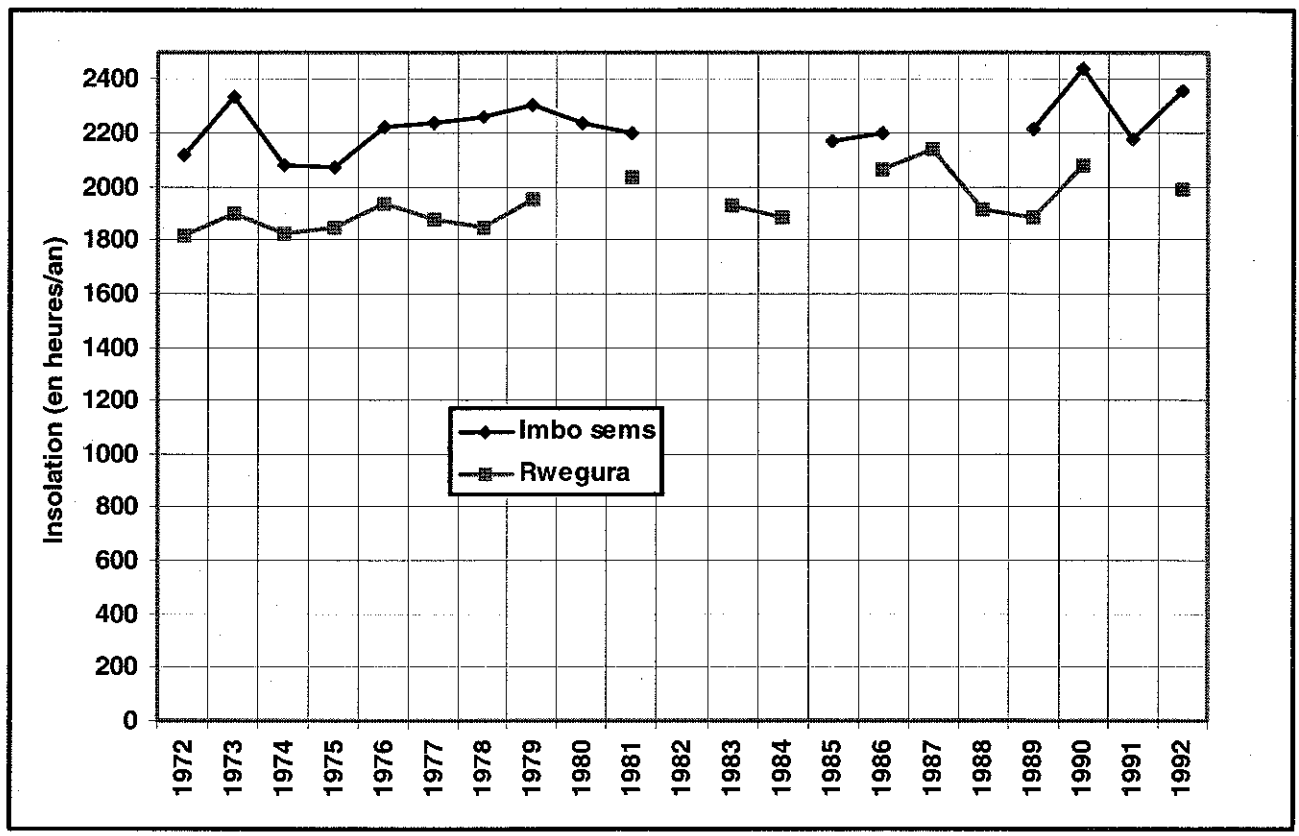
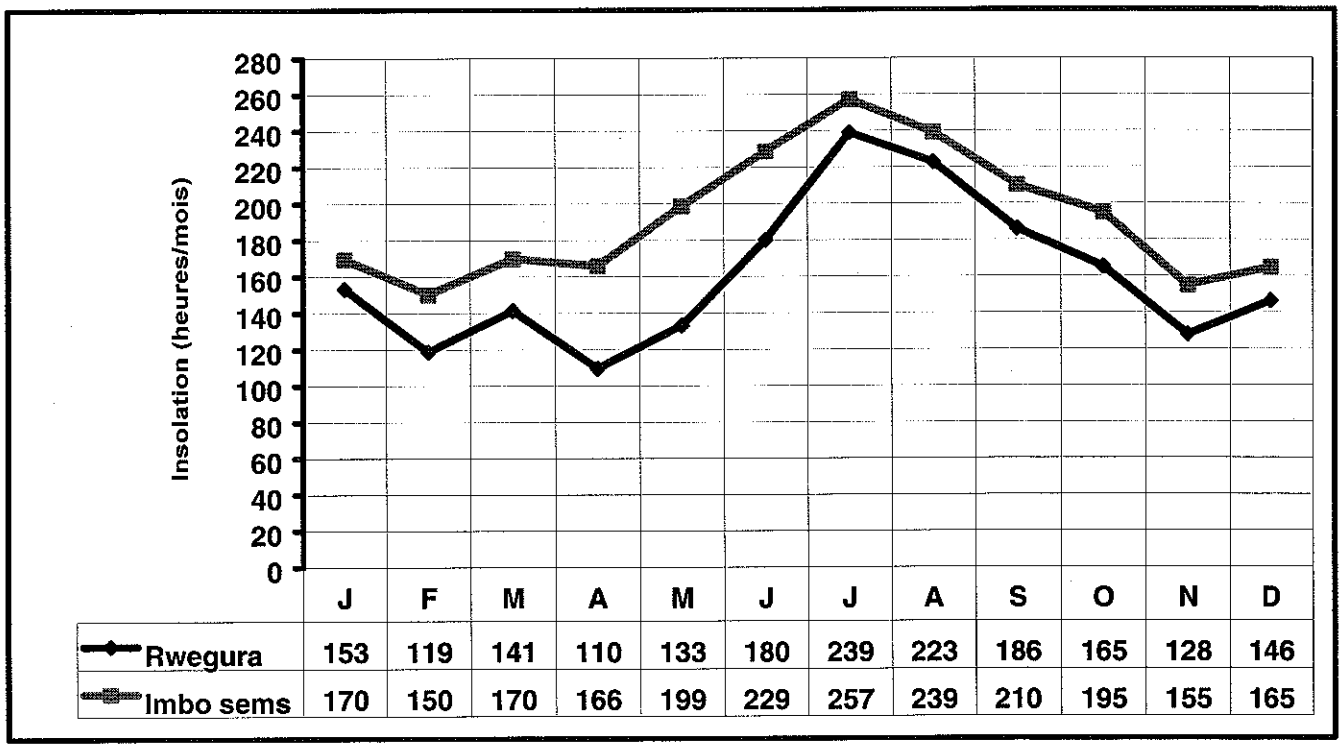


Fig.IV.11 : Insolation annuelle aux stations de Rwegura et Imbo semencier (période 1972- 1992).

Les données sont manquantes à l'Imbo semencier pour les années 1982, 1983, 1984, 1987 et 1988 et à Rwegura pour les années 1980, 1982, 1985 et 1991.

Au cours de l'année, la saison sèche est la plus ensoleillée avec un maximum au mois de juillet. Le mois d'avril a l'insolation la plus réduite (fig. IV.12).



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rwegura	153	119	141	110	133	180	239	223	186	165	128	146
Imbo sems	170	150	170	166	199	229	257	239	210	195	155	165

Fig. IV.12 : Variation mensuelle de l'insolation aux stations de Rwegura et Imbo semencier (année moyenne 1972 -1992).

IV.6. Vitesse du vent

La plaine de la Rusizi est le siège des brises locales soufflant du lac Tanganyika vers la terre pendant la journée et vice - versa pendant la nuit. Les vents au sol sont faibles durant la nuit et la matinée et se renforcent généralement dans l'après-midi.

Au cours de l'année, les vitesses élevées sont mesurées pendant la saison sèche. La moyenne annuelle reste faible, comprise entre 4 et 5 km/h dans la basse Rusizi et diminue progressivement avec l'éloignement du lac pour atteindre 2 km/h dans la moyenne Rusizi.

IV.7. Paramètres des bilans de la plaine

Les paramètres qui viennent d'être discutés influencent directement l'évapotranspiration, celle-ci entrant à son tour en ligne de compte dans l'établissement des bilans hydriques et hydrologiques d'une région donnée.

Nous reprenons ci-dessous la définition des principaux paramètres qui interviennent dans le calcul de ces bilans.

L'évapotranspiration représente une partie des pluies qui est reprise par évaporation physique (fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère agissant

sur les surfaces d'eau libre et à la surface du sol) ou par évaporation physiologique (eau évaporée par la transpiration des végétaux).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée et transpirée si les réserves en eau sont suffisantes pour satisfaire l'évaporation.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau restituée à l'atmosphère dans les conditions naturelles d'humidité du sol. Elle s'exprime, généralement, par la hauteur de la lame d'eau transpirée sur un bassin versant pendant une période déterminée . Elle est fonction de l'ETP et de la quantité d'eau disponible.

Le stock d'humidité du sol (S) représente la quantité d'eau contenue dans le sol, exprimée en millimètre de hauteur d'eau , susceptible d'être soumise à l'évapotranspiration.

L'eau utile (Eu) est définie comme étant l'eau disponible pour alimenter l'infiltration vers la nappe et le ruissellement, déduction faite de l'évapotranspiration réelle et du stock d'humidité du sol.

IV.7.1. Méthodes de calcul de l'ETP

De nombreux auteurs ont cherché à établir des expressions rattachant la valeur de l'ETP aux facteurs climatiques. Certaines formules proposées résultent d'ajustements statistiques et peuvent de ce fait être qualifiées d'empiriques, d'autres procèdent d'un raisonnement physique plus rigoureux assortis de quelques hypothèses.

IV.7.1.1. Formule de Thornthwaite

C.W Thornthwaite (1948), par ajustement statistique des mesures expérimentales d'ETP obtenues sur des cases lysimétriques aux données climatologiques de température, a abouti à la formule suivante de l'ETP mensuelle :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T}{I}\right)^{a}$$

$$a = 1{,}6 \times \left(\frac{I}{100}\right) + 0{,}5$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{\frac{3}{2}}$$

T = température moyenne mensuelle de l'air en °c;

I = indice thermique de l'année considérée; il est égal à la somme des indices mensuels des 12 mois de l'année.

IV.7.1.2. Formule de Turc

Dans son calcul de l'ETP mensuelle, L.Turc (1962) a utilisé deux paramètres météorologiques : la température moyenne mensuelle et la durée d'insolation :

$$ETP = 0{,}40\frac{T}{T+15}(Ig+50)$$

T = température moyenne mensuelle de l'air ;

Le coefficient est égal à 0,37 au lieu de 40 pour le mois de février ;

Ig = radiation solaire globale, elle est évaluée à partir de la durée d'insolation :

$$Ig = Iga(\alpha+\beta\frac{h}{H})$$

Iga = énergie de radiation qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère, exprimée en cal / cm² de surface horizontale et par jour pour le mois considéré ; sa valeur est donnée par le diagramme de S.L.Hess ;

h = durée réelle d'insolation

H = durée maximale d'insolation possible

$\frac{h}{H}$ = insolation relative calculée d'après les données d'un héliographe ;

α et β sont des paramètres liés à la latitude et à l'époque de l'année.

Le tableau 4.9 reprend quelques valeurs de α et β pour certaines régions du globe.

	Auteurs et lieu	Références	α	β
1	Turc	Annales agronomiques	0.18	0.62
	(France)	1961		
2	Clover et Mc Culor	Techniques rurales en Afrique	0.29 x cosl *	0.52
	(Régions tropicales)			
3	Station météorologique	Bulletin météorologique	0.17	0.62
	Casablanca	Casablanca		
4	Dupriez		0.405	0.646
	Kinshasa			
5	F.A.O		0.25	0.5
6	Fritz et Mac Donald		0.35	0.61
	(Etats-Unis)			
7	Penman		0.25	0.5
	Europe occidentale			
8	Buzingo			
	Kivoga (Burundi)	Etude du projet d'irrigation	0.29	0.52

Cosl* = cosinus de la latitude du lieu

Tableau 4.9 : Valeurs de α et β

(Source : Dautrebande (1982) ; cours d'hydrologie)

IV.7.1.3. Formule de Serra

Serra a proposé une formule tenant compte du degré hygroscopique de l'air :

$$ETP(mm) = 22{,}5\left(\frac{1-\varepsilon_m}{0{,}25}\right)\left(1-\frac{\tau^2}{1000}\right)e^{0{,}0644T_m}$$

T_m = température moyenne mensuelle de l'air en C°

τ = demi amplitude de variation des températures mensuelles extrêmes

ε_m = degré hygrométrique moyen mensuel de l'air

IV.7.1.4. Formule de Penman

La méthode de Penman est basée sur une évaluation du bilan énergétique de la surface évaporante. Elle implique la connaissance de paramètres climatiques tels que l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la durée d'insolation. La formule a une forme complexe que nous reproduisons ci-dessous:

$$ETP = \left[Iga(1-a)(\alpha+\beta\frac{h}{H}) - \sigma T^4 (0{,}56-0{,}08\sqrt{e})(0{,}10+0{,}90\frac{h}{H}) \right] \frac{1}{59} \times \frac{\frac{F_T'}{\gamma}}{\frac{1+F_T'}{\gamma}} + \frac{0{,}26}{1+\frac{F'_T}{\gamma}} (e_w - e)(1+0{,}4V$$

Iga = radiation solaire directe en l'absence de l'atmosphère (cal/cm²)

a = albedo de la surface évaporante

h = durée réelle de l'insolation (heures et dixième)

H = durée maximale possible d'insolation (heures et dixièmes)

T = température de l'air sous abri en degrés Kelvin

$\sigma = 1{,}19 \times 10^{-7}\, cal / cm^2 / jour / ^\circ K$ = constante de Stephan-Boltzman

e = tension de la vapeur d'eau mesurée sous abri (en mb)

e_w = tension maximale de la vapeur d'eau pour la température T (en mb)

γ = constante psychrométrique

F'_T = pente de la courbe des tensions de vapeur saturante

V = vitesse moyenne du vent en m/s mesurée à 10 m au dessus de la surface évaporante .

Comme on le voit, les calculs qui conduisent à évaluer l'ETP par la formule de Penman sont assez fastidieux et impliquent la détermination de plusieurs paramètres climatiques.

Par la suite, nous utiliserons la méthode de Thornthwaite pour déterminer l'ETP. En effet, seules les données de pluviométrie et de température s'étendent sur la période considérée (1972-1992).

IV.7.2. Evaluation des paramètres

Le calcul des paramètres ETP, ETR, S, et Eu par le modèle de Thornthwaite tient compte des considérations suivantes :

1. si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP:

a) E.T.R est égale à l'ETP;

b) l'excédent des précipitations du mois sur l'ETP est emmagasiné dans l'humidité du sol dont il augmente les réserves jusqu'à ce que ce dernier soit saturé (Thornthwaite admet que la saturation est atteinte lorsque les réserves constituant l'humidité du sol atteignent 100mm d'eau) ;

c) la partie de l'éventuel excédent dépassant les réserves cumulées de 100 mm admises ci-dessus, constitue l'eau utile et se trouve disponible pour l'alimentation de l'écoulement de surface et des nappes profondes.

2. Si les précipitations du mois sont inférieures à l'ETP, l'ETR est la somme des précipitations du mois et de tout ou une partie des réserves d'eau du sol; celle-ci est supposée mobilisée comme suit:

a) si les réserves antérieures d'humidité du sol sont suffisantes pour combler l'insuffisance des précipitations, l'ETR est égale à l'ETP ; ces réserves sont alors réduites de la différence entre l'ETP et les précipitations du mois considéré ;

b) si les réserves d'humidité du sol sont insuffisantes pour satisfaire l'ETP, l'ETR reste inférieure à l'ETP. Elle est égale à la somme des précipitations du mois et des réserves disponibles.

Pruvot (1974) a mené durant quatre ans des études hydrologiques dans les bassins versants orientaux de la Rusizi et a estimé que le stock maximal d'humidité du sol variait entre 80 et 100 mm.

Sur base de données climatologiques disponibles aux stations de Bujumbura aéroport, Mparambo et Rwegura qui représentent respectivement la basse Rusizi, la moyenne Rusizi et la crête Congo-Nil, nous avons déterminé les éléments du bilan au pas de temps mensuel de septembre 1972 jusqu'en août 1992, soit vingt années hydrologiques.

IV.7.2.1. Basse Rusizi

Le tableau 4.10 reprend les paramètres climatiques annuels calculés à la station de Bujumbura aéroport.

Année	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92		Moy	Max	Min
P(mm)	870	752	658	661	799	865	859	702	899	683	866	748	853	902	837	768	1145	839	690	718		**806**	**1145**	**658**
T(°c)	23.8	23.7	23.6	23.5	23.9	24.1	24.0	24.1	24.2	24.0	24.6	23.9	24.1	24.1	24.3	24.8	24.2	24.5	24.4	24.0		**24.1**	**24.8**	**23.5**
I	125	124	123	122	126	127	126	127	128	126	131	125	127	127	128	133	128	130	129	126		**127**	**133**	**122**
ETP(mm)	963	964	958	957	969	971	967	971	975	970	985	970	973	975	975	990	978	984	983	971		**972**	**990**	**957**
ETR(mm)	776	728	640	661	759	711	714	682	791	683	730	728	707	708	797	768	828	738	690	718		**728**	**828**	**640**
Eu (mm)	94	24	18	0	39	154	145	20	108	0	136	20	146	194	40	0	317	101	0	0		**78**	**317**	**0**

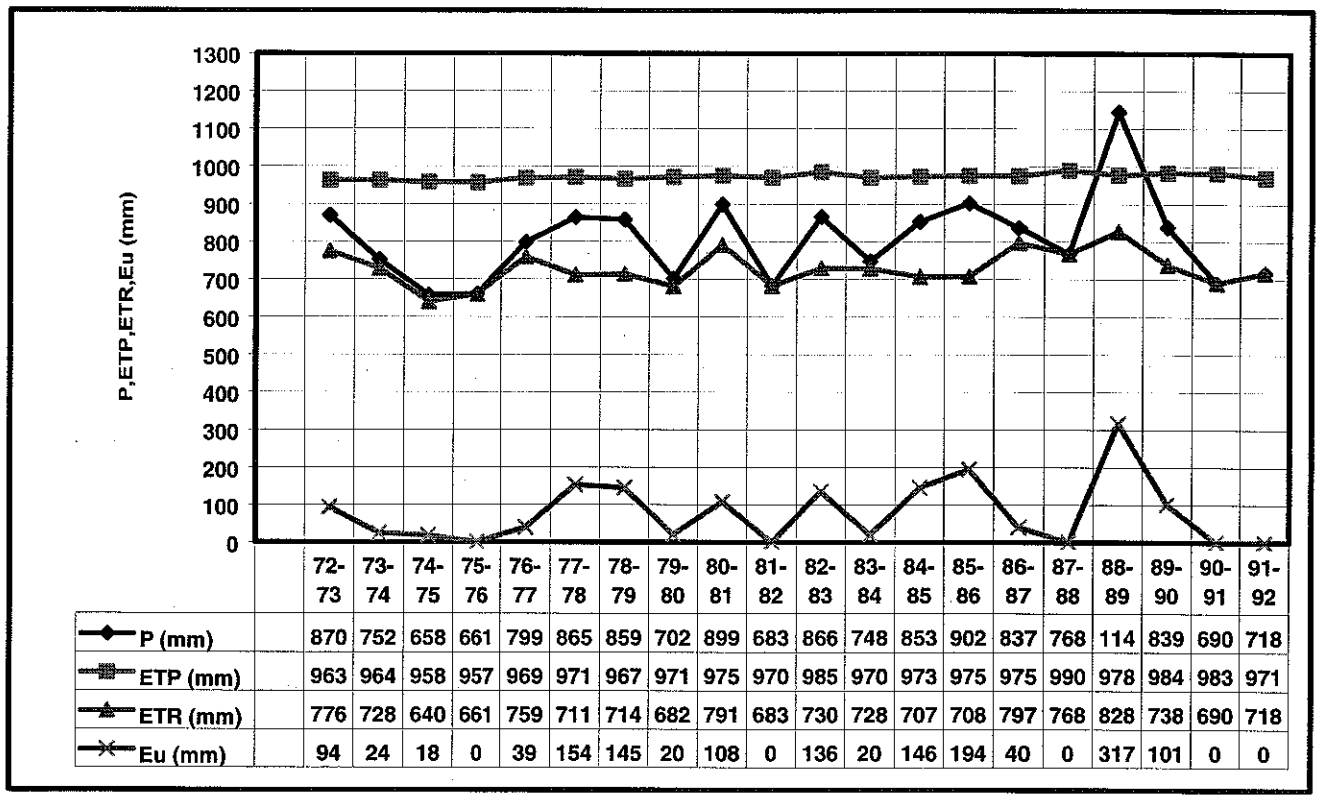
Tableau 4.10 : Paramètres climatiques de la basse Rusizi, station de Bujumbura aéroport, période 1972-1992.

La figure IV.13 affiche la variation des paramètres climatiques de la basse Rusizi entre 1972 et 1992 :

- à l'exception de l'année 88-89, l'ETP annuelle est toujours supérieure à la pluviométrie, elle est comprise entre 957 et 990 mm et sa moyenne annuelle est égale à 972 mm soit 121% des précipitations annuelles ;

- l'ETR est comprise entre 640 et 828 mm, avec une moyenne annuelle égale à 728 mm, soit 90% de P ;

- l'Eu varie entre 0 et 317 mm. Sur la période considérée, la majorité des années hydrologiques fournissent une hauteur d'eau utile inférieure à 50 mm et cinq années : 75-75, 81-82, 87-88, 90-91 et 91-92 n'ont pas donné d'eau utile. La moyenne annuelle est égale à 78 mm soit près de 10% de P.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	870	752	658	661	799	865	859	702	899	683	866	748	853	902	837	768	114	839	690	718
ETP (mm)	963	964	958	957	969	971	967	971	975	970	985	970	973	975	975	990	978	984	983	971
ETR (mm)	776	728	640	661	759	711	714	682	791	683	730	728	707	708	797	768	828	738	690	718
Eu (mm)	94	24	18	0	39	154	145	20	108	0	136	20	146	194	40	0	317	101	0	0

Fig.IV.13 : Variation annuelle des paramètres climatiques dans la basse Rusizi, station de Bujumbura aéroport : période 1972-1992.

IV.7.2.2. Moyenne Rusizi

Le tableau 4.11 et la fig. IV.14 reprennent les paramètres climatiques de la moyenne Rusizi à la station de Mparambo :

- l'ETP annuelle est comprise entre 958 et 1002 mm , la moyenne est égale à 977 mm soit 104% de P ;

- l'ETR annuelle est comprise entre 682 et 919 mm, la moyenne est égale à 798 mm soit 85% de P ;

- l'Eu utile annuelle est comprise entre 0 et 322 mm, la moyenne est égale à 139 mm soit 15% de P.

On peut remarquer que dans cette partie de la plaine, seules deux années : 75-76 et 83-84 ne donnent pas d'eau utile. Toutes les autres années présentent une hauteur annuelle d'eau utile supérieure à 50 mm.

Année	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92		Moy	Max	Min
P mm)	976	1084	745	682	954	1022	1032	836	1072	853	966	793	932	782	1165	972	1013	935	1059	864		**937**	**1165**	**682**
T(°c)	23,9	23,6	24,0	23,7	24,2	23,9	23,9	24,1	24,3	24,1	24,9	24,0	24,0	24,2	24,2	24,8	24,2	24,5	24,5	24,3		**24,2**	**24,9**	**23,6**
I	125	123	126	124	128	126	126	127	129	127	133	126	126	128	127	133	128	130	130	129		**128**	**133**	**123**
ETP(mm)	970	958	971	965	974	968	968	977	980	977	993	972	967	975	976	997	978	984	1002	980		**977**	**1002**	**958**
ETR(mm)	758	919	700	682	816	795	815	762	845	781	831	793	789	728	843	877	772	779	859	807		**798**	**919**	**682**
Eu (mm)	219	164	46	0	138	227	218	74	228	73	135	0	142	54	322	95	245	156	200	56		**139**	**322**	**0**

Tableau 4.11 : Paramètres climatiques de la moyenne Rusizi , station de Mparambo : période 1972-1992.

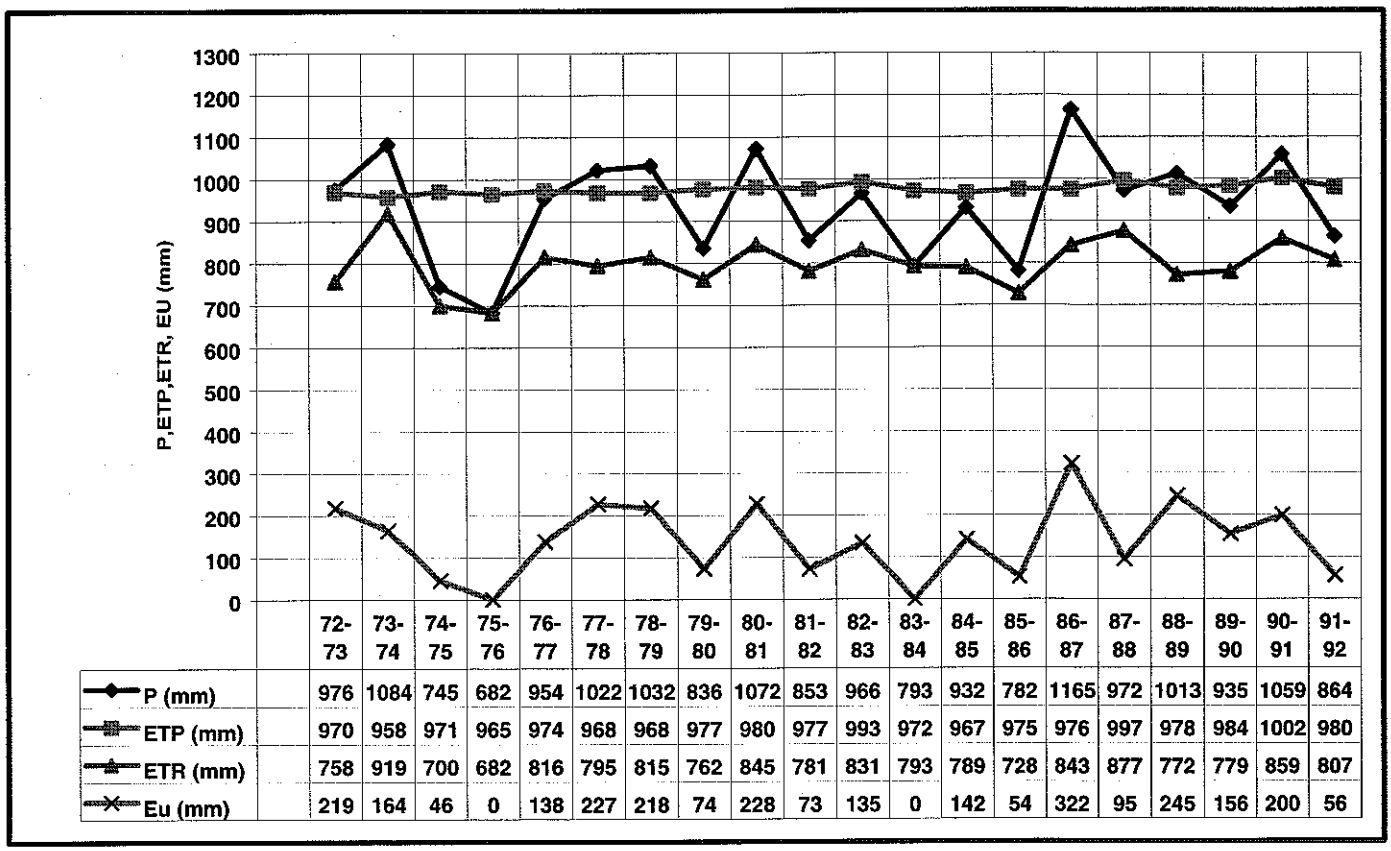


Fig.IV.14 : Variation annuelle des paramètres climatiques dans la moyenne Rusizi, station de Mparambo : période 1972-1992.

IV.7.2.3. Crête Congo-Nil

Le tableau 4.12 et la fig.IV.15 fournissent les paramètres climatiques de la crête Congo-Nil représentée par la station de Rwegura :

- l'ETP annuelle varie de 717 et 776 mm, la moyenne annuelle est égale à 738 mm soit 45 % de P ;

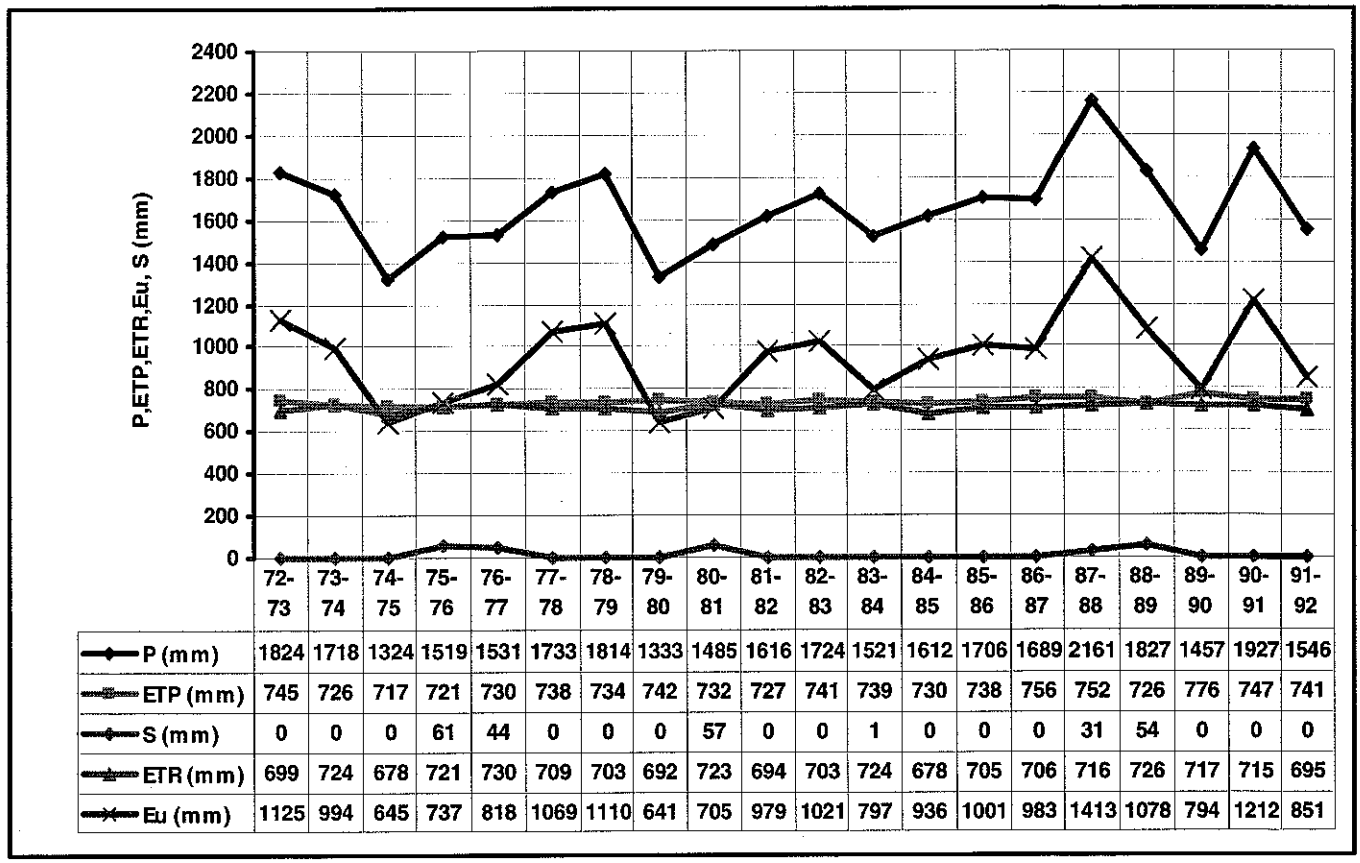
- l'ETR varie de 678 et 730 mm, la moyenne est égale à 708 mm soit 43 % de P. Durant les années 75-76, 76-77 et 88-89, l'ETR annuelle est égale à l'ETP ;

- l'Eu annuelle varie de 641 à 1413 mm et sa moyenne annuelle est égale à 945 mm soit 57 % de P ;

- contrairement à la plaine où le stock d'humidité du sol est nul à la fin de chaque année hydrologique, dans le bassin supérieur, certaines années gardent une certaine quantité de stock d'humidité. C'est le cas des années 75-76, 76-77, 80-81, 87-88 et 88-89.

Année	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92		Moy	Max	Min
P (mm)	1824	1718	1324	1519	1531	1733	1814	1333	1485	1616	1724	1521	1612	1706	1689	2161	1827	1457	1927	1546		**1653**	**2161**	**1324**
T(°C)	16.1	15.4	15.1	15.2	15.7	15.8	15.7	16.0	15.6	15.4	16.0	15.9	15.7	15.8	16.5	16.3	15.4	16.1	16.2	16.0		**16**	**16**	**15**
I	69.3	65.1	63.3	63.8	66.5	67.3	67.0	68.8	66.3	64.9	69.0	68.2	66.5	67.4	71.8	70.4	65.1	69.4	70.2	68.9		**67**	**72**	**63**
ETP (mm)	745	726	717	721	730	738	734	742	732	727	741	739	730	738	756	752	726	776	747	741		**738**	**776**	**717**
S (mm)	0	0	0	61	44	0	0	0	57	0	0	1	0	0	0	31	54	0	0	0		**13**	**61**	**0**
ETR (mm)	699	724	678	721	730	709	703	692	723	694	703	724	678	705	706	716	726	717	715	695		**708**	**730**	**678**
Eu (mm)	1125	994	645	737	818	1069	1110	641	705	979	1021	797	936	1001	983	1413	1078	794	1212	851		**945**	**1413**	**641**

Tableau 4.12 : Paramètres climatiques de la crête Congo-Nil, station de Rwegura : période 1972-1992.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	1824	1718	1324	1519	1531	1733	1814	1333	1485	1616	1724	1521	1612	1706	1689	2161	1827	1457	1927	1546
ETP (mm)	745	726	717	721	730	738	734	742	732	727	741	739	730	738	756	752	726	776	747	741
S (mm)	0	0	0	61	44	0	0	0	57	0	0	1	0	0	0	31	54	0	0	0
ETR (mm)	699	724	678	721	730	709	703	692	723	694	703	724	678	705	706	716	726	717	715	695
Eu (mm)	1125	994	645	737	818	1069	1110	641	705	979	1021	797	936	1001	983	1413	1078	794	1212	851

Fig.IV.15 : Variation annuelle des paramètres climatique de la crête Congo-Nil Station de Rwegura : période 1972-1992.

IV.8. Discussions sur les paramètres du bilan

L'ETP annuelle est de 950 mm à 1000 mm et varie peu de la basse Rusizi (station de Bujumbura) à la moyenne Rusizi (station de Mparambo), ce qui est normal parce que, dans toute la plaine, la variation de température reste faible.

A cause de l'irrégularité des précipitations, le rapport ETP/P varie dans de larges limites : de 0.85 à 1.46 dans la basse Rusizi et de 0.84 à 1.41 dans la moyenne Rusizi.

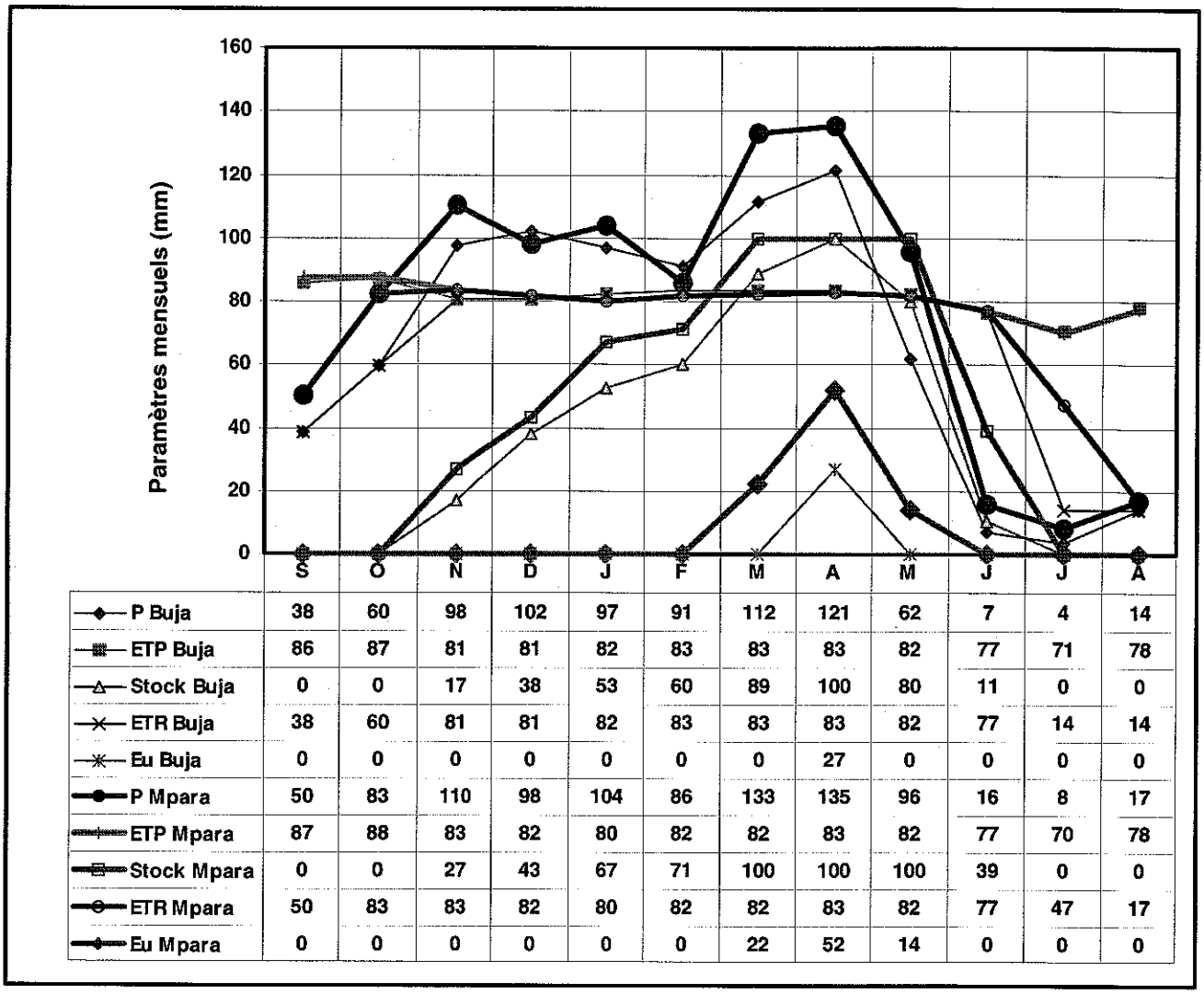
L'ETR moyenne annuelle déduite du modèle de Thornthwaite varie de 725 mm dans la basse Rusizi à 800 mm dans la moyenne Rusizi.

En moyenne, l'eau utile capable d'alimenter les nappes de la plaine ne dépasse guère 80 mm dans la basse Rusizi, à peine 140 mm dans la plaine de la moyenne Rusizi.

Par rapport à la plaine, les conditions climatiques qui prévalent dans le bassin supérieur sont favorables pour avoir une grande quantité d'eau utile : la pluviométrie y est plus élevée, la température moins élevée et

l'évapotranspiration réduite. La hauteur minimale annuelle d'eau utile enregistrée à la station de Rwegura est égale à 641 mm (79-80).

Pour pouvoir analyser l'évolution des paramètres au cours de l'année, nous avons calculé ces paramètres sur une année hydrologique fictive 1972-1992.



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P Buja	38	60	98	102	97	91	112	121	62	7	4	14
ETP Buja	86	87	81	81	82	83	83	83	82	77	71	78
Stock Buja	0	0	17	38	53	60	89	100	80	11	0	0
ETR Buja	38	60	81	81	82	83	83	83	82	77	14	14
Eu Buja	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0
P Mpara	50	83	110	98	104	86	133	135	96	16	8	17
ETP Mpara	87	88	83	82	80	82	82	83	82	77	70	78
Stock Mpara	0	0	27	43	67	71	100	100	100	39	0	0
ETR Mpara	50	83	83	82	80	82	82	83	82	77	47	17
Eu Mpara	0	0	0	0	0	0	22	52	14	0	0	0

Fig.IV.16 : Variation mensuelle des paramètres climatiques de la plaine, stations de Bujumbura et Mparambo : année moyenne 1972-1992.

La fig.IV.16 fournit leur variation mensuelle dans la basse (station de Bujumbura) et moyenne Rusizi (station de Mparambo). On peut tirer les renseignements suivants :

- l'ETP est légèrement plus élevée pendant la saison de pluie (ETP > 80 mm) que durant la saison sèche, sa valeur minimale (70 mm) est calculée au mois de juillet ;

- le stock d'humidité, qui est nul de juin à octobre, se reconstitue à partir du mois de novembre. Son niveau maximal (100 mm) est enregistré au mois d'avril dans la basse Rusizi et aux mois de mars, avril et mai dans la moyenne Rusizi ;

- l'ETR est satisfaite (ETR = ETP) entre novembre et juin ;

- dans la basse Rusizi, l'eau utile n'est disponible qu'en avril. Elle présente en mars, avril et mai dans la moyenne Rusizi.

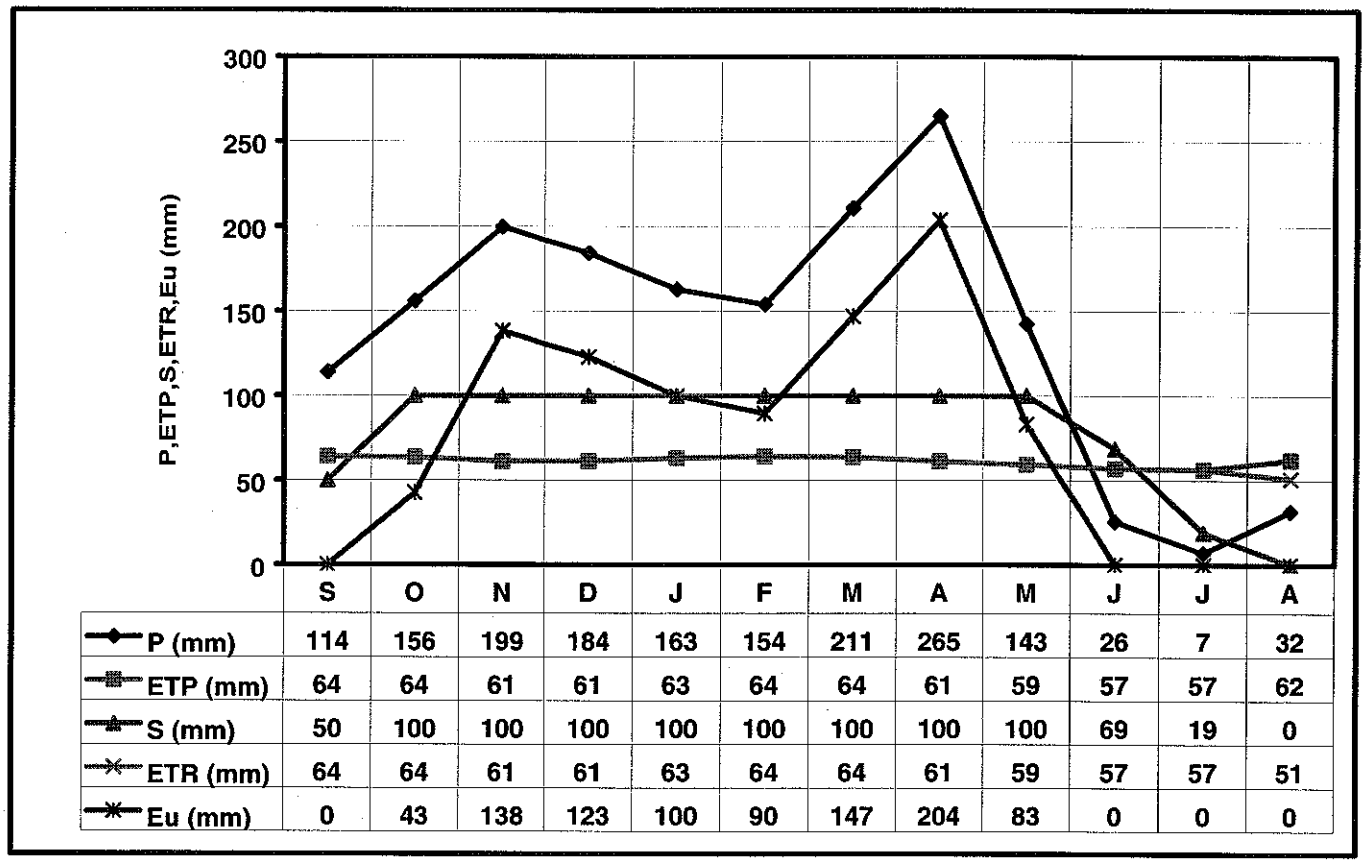
En utilisant la formule de Turc, Buzingo (1972) a calculé le déficit hydrique (P-ETP < 0) entre 1936 et 1970 à la périphérie de la plaine de la basse Rusizi (station de Kivoga). Il a conclu qu'il faudrait théoriquement irriguer la plantation de café de Kivoga pendant les mois de mai, juin, juillet, août, septembre et octobre. Ces mois correspondent exactement aux mois qui accusent un déficit hydrique déduit de la méthode de Thornthwaite (IV.16).

La fig.IV.17 montre la variation mensuelle des paramètres climatiques dans le bassin supérieur (station de Rwegura) :

- l'ETR, peu variable est égale à l'ETP pendant 11 mois successifs (de septembre à juillet ;

- le stock d'humidité du sol se trouve à son niveau maximal (100 mm) pendant huit mois successifs (d'octobre à mai) et il n'est nul que pendant le mois d'août ;

- l'eau utile est disponible d'octobre et à mai et sa hauteur mensuelle présente deux maxima : en novembre (138 mm) et avril (204 mm).



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	114	156	199	184	163	154	211	265	143	26	7	32
ETP (mm)	64	64	61	61	63	64	64	61	59	57	57	62
S (mm)	50	100	100	100	100	100	100	100	100	69	19	0
ETR (mm)	64	64	61	61	63	64	64	61	59	57	57	51
Eu (mm)	0	43	138	123	100	90	147	204	83	0	0	0

Fig.IV.17 : Variation mensuelle des paramètres climatiques dans le bassin supérieur, station de Rwegura : année moyenne 1972-1992.

Les bilans hydriques que nous venons d'établir prouvent à suffisance la nécessité de réaliser l'étude des nappes aquifères de la plaine de la Rusizi. En effet, nous sommes en présence d'une région à évapotranspiration élevée et à faible pluviosité. L'eau utile disponible pour alimenter les nappes ne représente en moyenne que 15% de la pluviométrie de la moyenne Rusizi moins de 10% dans la basse Rusizi et certaines années hydrologiques sèches n'en présentent pas.

Quelle est la quantité d'eau en provenance des bassins supérieurs, susceptibles d'alimenter les nappes de la plaine ? Nous allons l'évaluer à partir des bilans hydrologiques des bassins versants des rivières Nyakagunda, Nyamagana, Muhira, Kaburantwa, Kagunuzi, et Mpanda . C'est l'objet du chapitre suivant.

V. Bilans hydrologiques des bassins orientaux de la Rusizi

V.1. Généralités

Alors que la partie supérieure des bassins est copieusement arrosée pendant la saison de pluie, nous avons vu au chapitre précédent que la plaine de la Rusizi présente un bilan hydrique déficitaire pendant une grande période de l'année. Quel est l'apport en eau des bassins susceptibles d'alimenter les nappes de la plaine ?

Afin de pouvoir répondre à cette question, nous abordons ci-dessous l'étude hydrologique de six bassins qui sont drainés par les principales rivières prenant source dans la crête Congo Nil, échine de montagnes qui s'étend du NNW au SSE sur le Rwanda, le Burundi et la Tanzanie. Toutes ces rivières parcourent la partie orientale de la plaine avant de se jeter dans la rivière Rusizi.

La rivière Rusizi assure la liaison entre les lacs Kivu et Tanganyika. Du lac Kivu jusqu'aux abords de la plaine, elle coule dans un lit très étroit et présente de temps à autre des chutes souvent importantes. Des barrages alimentant en électricité l'est du Congo, le Rwanda et le Burundi ont été construits dans cette partie de la rivière.

Dans la plaine, la Rusizi matérialise la frontière naturelle entre la R.D. du Congo et le Burundi. Ici, la pente du lit diminue, de nombreux méandres apparaissent progressivement et, à son entrée dans la plaine de la basse Rusizi, son tracé devient anastomosé et la pente devient très faible (< 0.1%), ce qui se signale par des marais qui peuvent avoir localement 5 km de large. La figure V.1 affiche le profil en long de la Rusizi, de la rivière Nyakagunda jusqu'au lac Tanganyika. Avant de se jeter dans le lac, la Rusizi se subdivise en deux branches appelées « la petite et la grande Rusizi » formant le delta de la Rusizi.

Le lac Tanganyika , avec 1470 m de profondeur, est le deuxième lac le plus profond du monde après le lac Baïkal. Il s'étend du NNW au SSE sur une longueur de 650 km, une largeur de 35 à 75 km et une superficie de 32600 km^2. Son volume d'eau est estimé à 18.880 km^3. Le lac reçoit directement les eaux de ruissellement en provenance de la partie occidentale de la crête Congo Nil et celles de la partie orientale des montagnes du Congo. Il se déverse dans le fleuve Congo par intermédiaire de la rivière Lukuga.

Les affluents orientaux de la Rusizi, en provenance de la crête Congo Nil traversent les contreforts, une région caractérisée par de fortes pentes, des vallées en gorge où les rivières exercent une érosion vigoureuse et se chargent de matériaux solides en suspension. Pendant la saison des pluies, la région est connue pour ses glissements de terrain, emportant parfois au passage habitations, routes et ponts.

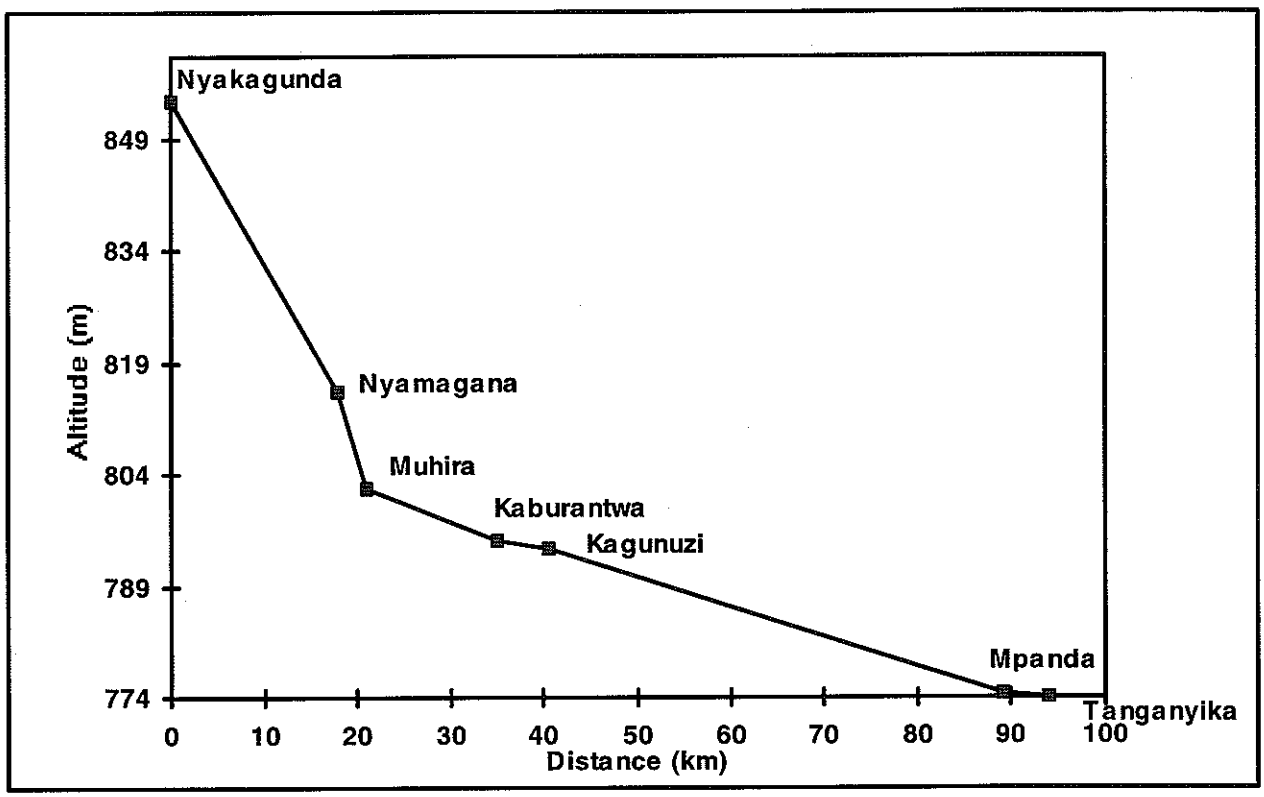


Fig.V.1 : Profil en long de la Rusizi entre la Nyakagunda et le lac Tanganyika.

A l'entrée dans la plaine, les rivières déposent progressivement les matériaux au fur et à mesure que la pente diminue, causant l'ensablement et la diminution de la section du lit. Les débordements des rivières qui en résultent provoquent des inondations, surtout dans sa partie la plus basse, contribuant à l'alimentation des nappes de la plaine.

Dans ce chapitre, nous analysons les bilans des affluents de la rive gauche de la Rusizi (partie burundaise) à savoir : les rivières Nyakagunda, Nyamagana, Muhira, Kaburantwa et Kagunuzi qui traversent la plaine de la moyenne Rusizi, ainsi que la Mpanda, principale rivière traversant la plaine de la basse Rusizi .

La Mpanda possède deux échelles limnimétriques, l'une à Gatura avant son entrée dans la plaine, l'autre dans la plaine au voisinage d'une route appelée axe D. Afin de pouvoir étudier le comportement de cette rivière lors de son passage dans deux régions aux conditions climatiques différentes, les bilans hydrologiques ont été établis aux deux stations.

Les bilans sont calculés entre 1972 et 1992, période pendant laquelle les données hydrologiques et hydrométéorologiques sont disponibles.

L'établissement des courbes de tarissement (quand les débits journaliers sont disponibles) a permis d'étudier l'évolution des débits pendant la saison sèche, quand l'écoulement n'est assuré que par l'apport des nappes souterraines. Les coefficients de tarissement obtenus permettent d'évaluer les réserves du bassin supérieur et leur variation d'une année hydrologique à l'autre.

V.2. Caractéristiques physiographiques

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire (Eskenazi, 1991). Il importe d'en connaître ses caractéristiques de forme et de pente ainsi que sa constitution géologique, qui jouent un grand rôle lors de cet écoulement.

Pour les affluents de la Rusizi, les caractéristiques sont déterminées au niveau des différentes échelles limnimétriques , leurs coordonnées géographiques ainsi que les principaux paramètres physiographiques calculés sont renseignés au tableau 5.1.

Bassin	Lieu	Alt.	Lat.	Long	S totale	S échelle	P	K	L	I	L/I
	Station	m			km²	limn	km	km	km	km	
Nyakagunda	Musenyi	980	2°46's	29°52'e	142	129	53.9	1.34	20.7	6.2	3.3
Nyamagana	Murambi	876	2°54's	29°08'e	218.7	216.8	79.5	1.52	33.2	6.5	5.1
Muhira	Ruhag	841	2°55's	28°09'e	239	234.2	74	1.36	28.9	8.1	3.6
Kaburantwa	Mission	804	2°60's	29°13'e	557	547.5	134.3	1.62	57.7	9.5	6.1
Kagunuzi	Ndava	798	3°02's	29°16'e	439.9	438.3	117.8	1.59	50.2	8.7	5.8
Mpanda	Gatura	940	3°07's	29°24'e	240	240	75.3	1.37	29.5	8.1	3.6
Mpanda	Axe D	788	3°16's	29°19'e	498	480.7	104.4	1.34	40.3	11.9	3.4

Tableau 5.1 : Paramètres physiogaphiques des bassins

S (km²) : surface du bassin
P (km) : périmètre du bassin
L et I sont respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent .
K : coefficient de compacité de Gravelius
L/I: rapport de la longueur sur la largeur

Le rectangle équivalent est un rectangle ayant même surface et même périmètre que le bassin versant, donc de longueur L et de largeur I telles que :

$2 (L + I) = P$
$L . I = S$

On a :

$$2(L+\frac{S}{L}) = P$$

$$2L^2 - PL + 2S = 0$$

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$$

et $l = \frac{S}{L}$

La longueur (L) et la largeur (l) du bassin ont une certaine influence sur les crues, celles-ci sont réduites si la longueur est plus grande que la largeur.

En ce qui concerne les bassins étudiés, les bassins de la Nyakagunda, Muhira, Mpanda à Gatura et Mpanda à l'axe D sont moins longs (L/l < 4) et donc susceptibles de développer plus de crues que ceux de la Nyamagana, Kaburantwa et Kagunuzi plus allongés (L/l > 5)

Le coefficient de compacité de Gravelius (K) permet aussi d'apprécier le caractère plus ou moins ramassé d'un bassin. On l'établit en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même superficie.

$$K = 0.28\frac{P}{\sqrt{S}}$$

La valeur de K est toujours supérieure à 1 et est d'autant plus élevée que le bassin est allongé. Dans le cas des bassins étudiés, les coefficients de compacité sont compris entre 1.34 et 1.62. Les bassins de la Muhira (1.36), Nyakagunda (1.34) et Mpanda à Gatura (1.37) et à l'axe D (1.34) possèdent les plus petits coefficients et sont donc susceptibles de développer des crues plus fortes que les bassins de la Nyamagana (1.52), Kaburantwa (1.62) et Kagunuzi (1.59).

V.3. Pluviométrie des bassins

Les précipitations sont évaluées à partir des pluies enregistrées aux différentes stations climatologiques situées à l'intérieur des bassins ou à leur périphérie.

Afin de pouvoir comparer la pluviométrie à l'écoulement enregistré aux échelles limnimétriques, la période prise en compte s'étend de 1972 à 1992, période pendant laquelle les données sur les débits sont disponibles.

La pluviométrie tombée sur un bassin peut être estimée de différentes manières :

- la méthode de la moyenne arithmétique : on ne retient que les stations situées dans le bassin et on prend leur moyenne arithmétique. Cette méthode est simple mais peut conduire à des résultats très inexacts, surtout si la densité des stations élevées n'est pas uniforme ;

- la méthode des isohyètes : à partir des différentes mesures, on trace d'abord les courbes d'égales hauteurs de pluie ; on détermine ensuite la pluie moyenne en considérant qu'entre deux isohyètes consécutives, la pluie est uniforme et égale à la moyenne des deux valeurs d'isohyètes. Cette méthode est rigoureuse, car elle se rapproche de la pluviométrie moyenne, mais elle présente l'inconvénient de nécessiter pour chaque événement pluviométrique, le tracé des isohyètes ;

- la méthode des polygones de Theissen : à chaque station, on affecte la surface du polygone obtenu en traçant les médiatrices des segments reliant la station concernée aux voisines. La pluie moyenne est obtenue en faisant la somme pondérée des pluies aux différentes stations, le coefficient de pondération étant la surface du polygone concerné, rapportée à la superficie du bassin.

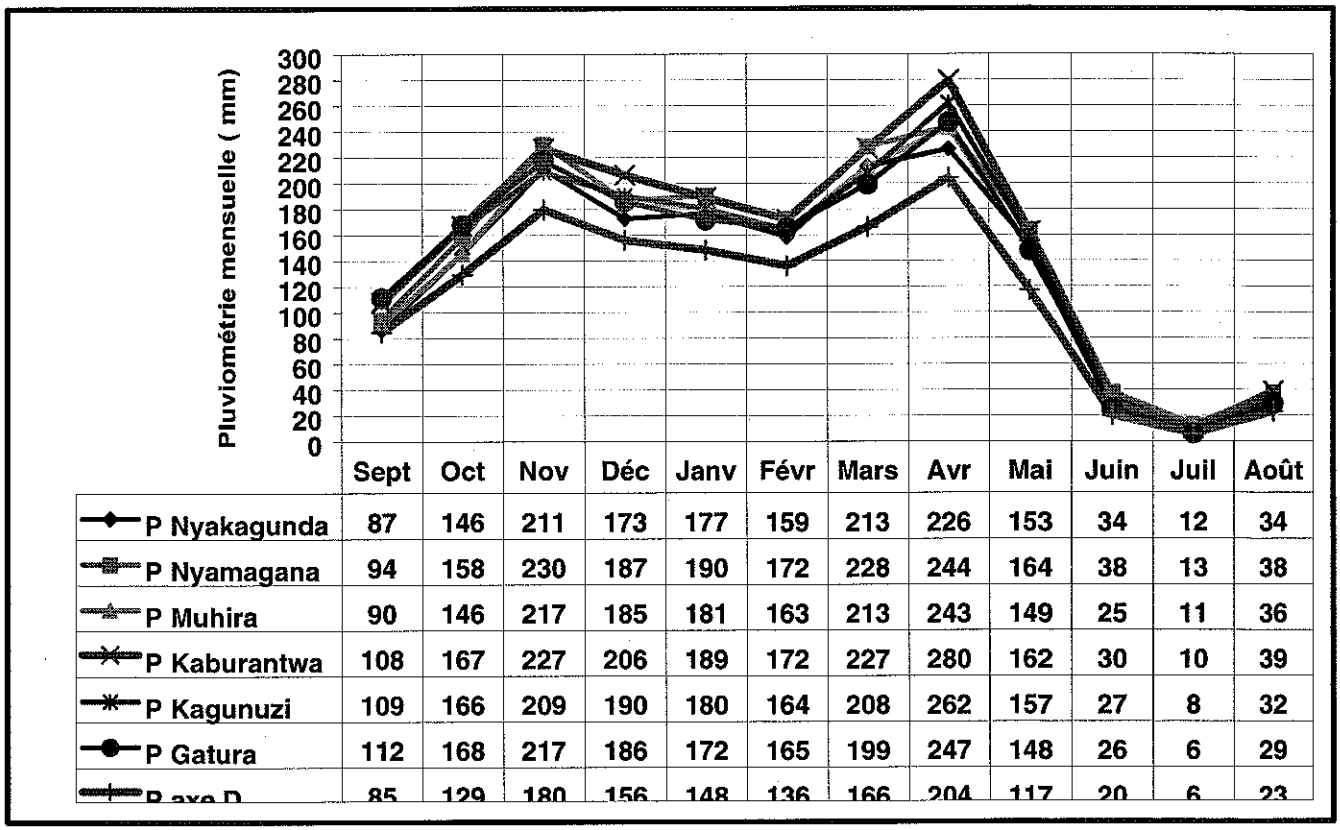
La méthode de Theissen a l'avantage de donner des coefficients de pondération indépendants de l'événement pluviométrique. C'est la méthode que nous avons utilisée pour déterminer la pluviométrie des bassins. Le tableau 5.2 fournit les coefficients de pondération appliqués à chaque station.

Stations pluviométriques					Bassins versants						
Station	Latitude	Longitude	Altitude		Nyakag	Nyama	Muhira	Kabur	Kagun	Mpanda	Mpanda
			(m)							Gatura	Axe D
				S (km²)	129	216.8	234.2	547.5	438.3	240	480.7
Mabayi	2°42'S	29°14'E	1509	Coefficients de pondération	0.63	0.75	0.4	0.27			
Mparambo	2°50'S	29°05'E	887		0.37	0.25	0.32				
Butara	2°53'S	29°20'E	1563				0.28	0.65	0.27		
Cibitoke	2°51'S	29°04'E	930					0.08			
Rwegura	2°55'S	29°14'e	2302						0.23		
Musigati	3°05'S	29°27'e	1473						0.5	0.61	0.4
Teza	3°26'S	29°36'e	2166							0.39	0.22
Kivoga	3°17'S	29°25'e	877								0.13
Imbo sems	3°11'S	29°21e	820								0.21
Buja aéro	3°19'S	29°19'e	783								0.05

Tableau 5.2 : Stations pluviométriques et coefficients de pondération.

V.3.1. Pluviométrie mensuelle

Les données de pluviométrie mensuelle pondérée sont reprises en annexe II.4 ; y figurent également, la pluviométrie annuelle, les hauteurs maximales et minimales mensuelles et les coefficients pluviométriques moyens mensuels. La fig.V.2 montre l'évolution de la pluviométrie au cours d'une année moyenne :



	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P Nyakagunda	87	146	211	173	177	159	213	226	153	34	12	34
P Nyamagana	94	158	230	187	190	172	228	244	164	38	13	38
P Muhira	90	146	217	185	181	163	213	243	149	25	11	36
P Kaburantwa	108	167	227	206	189	172	227	280	162	30	10	39
P Kagunuzi	109	166	209	190	180	164	208	262	157	27	8	32
P Gatura	112	168	217	186	172	165	199	247	148	26	6	29
P axe D	85	129	180	156	148	136	166	204	117	20	6	23

Fig. V.2 : Pluviométrie moyenne mensuelle.

- le mois de septembre marque habituellement le début de l'année hydrologique et enregistre 5 à 6% des précipitations, il est considéré comme un mois de transition entre la saison sèche et la saison de pluie ;

- le 1er maximum est repéré au mois de novembre avec 12 à 13% des précipitations annuelles, suivi d'une diminution progressive jusqu'au mois de février ;

- le mois de février correspond à une période appelée à tort « petite saison sèche » alors que la pluviométrie moyenne mensuelle dépasse 100 mm dans tous les bassins ;

- à partir du mois de mars, on observe une augmentation sensible de précipitations, celles-ci atteignant leur deuxième maximum au mois d'avril , le mois le plus pluvieux, qui enregistre 13 à 14% des précipitations annuelles ;

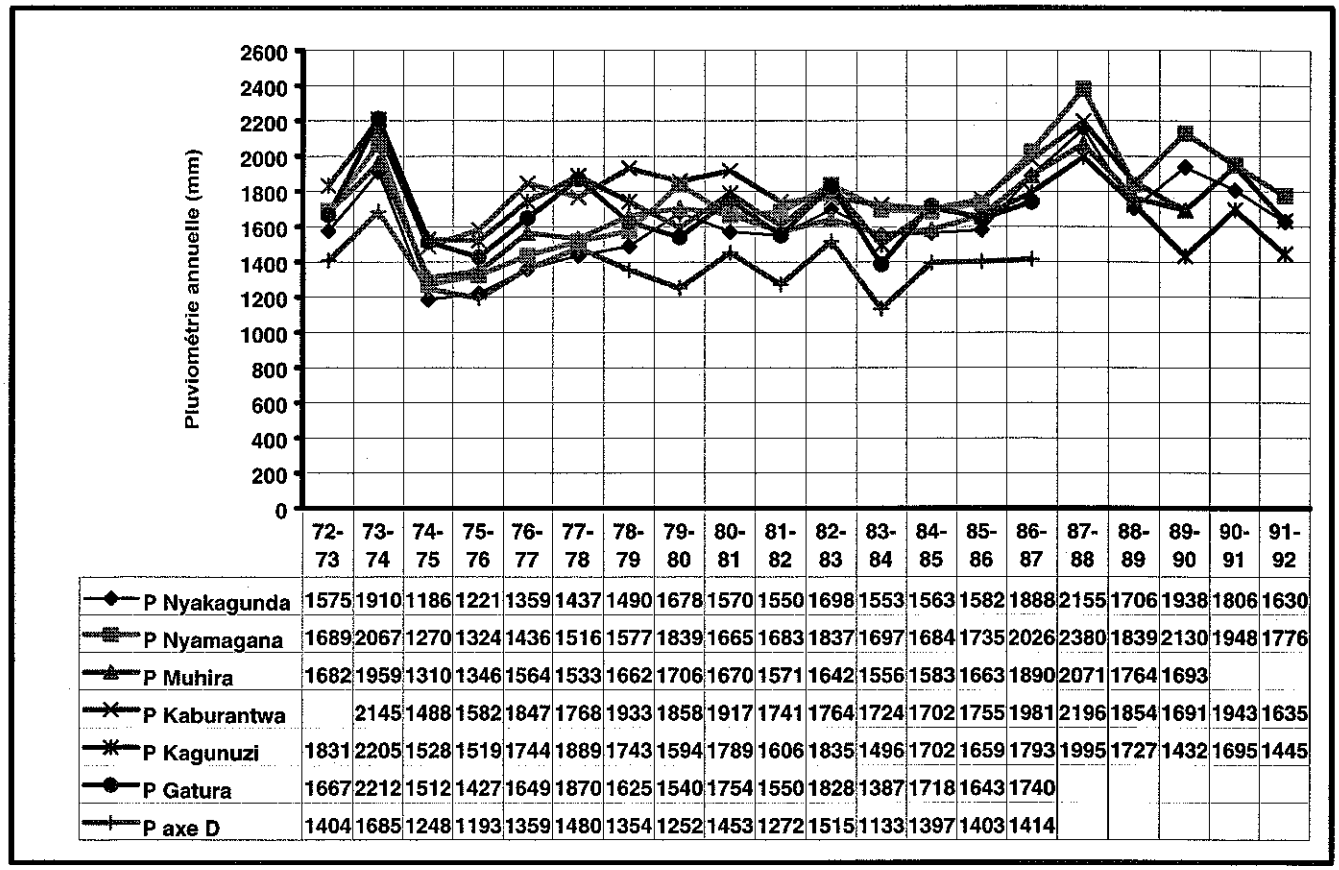
- la diminution des précipitations au mois de mai annonce l'arrivée de la saison sèche, qui commence généralement en juin pour se terminer à la fin du mois d'août ;

- de juin à août, on enregistre 3 à 5% des précipitations annuelles, le mois de juillet y contribuant pour 0 à 1%.

L'irrégularité des précipitations est mise en évidence par l'intervalle de variation (P max – P min) qui est très élevé, et cela pour tous les mois. Même durant les mois secs (juin – août), on peut enregistrer (exceptionnellement) une pluviométrie avoisinant 100 mm.

V.3.2. Pluviométrie annuelle

L'évolution de la pluviométrie est représentée à la fig.V.3, on observe :



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P Nyakagunda	1575	1910	1186	1221	1359	1437	1490	1678	1570	1550	1698	1553	1563	1582	1888	2155	1706	1938	1806	1630
P Nyamagana	1689	2067	1270	1324	1436	1516	1577	1839	1665	1683	1837	1697	1684	1735	2026	2380	1839	2130	1948	1776
P Muhira	1682	1959	1310	1346	1564	1533	1662	1706	1670	1571	1642	1556	1583	1663	1890	2071	1764	1693		
P Kaburantwa		2145	1488	1582	1847	1768	1933	1858	1917	1741	1764	1724	1702	1755	1981	2196	1854	1691	1943	1635
P Kagunuzi	1831	2205	1528	1519	1744	1889	1743	1594	1789	1606	1835	1496	1702	1659	1793	1995	1727	1432	1695	1445
P Gatura	1667	2212	1512	1427	1649	1870	1625	1540	1754	1550	1828	1387	1718	1643	1740					
P axe D	1404	1685	1248	1193	1359	1480	1354	1252	1453	1272	1515	1133	1397	1403	1414					

Fig.V.3 : Variation annuelle de la pluviométrie.

- deux années très humides : 73-74 et 87-88 avec une pluviométrie annuelle supérieure à 1500 mm à l'axe D et dépassant 1900 mm dans les autres bassins;

- deux années très sèches : 74-75 et 75-76 avec une pluviométrie inférieure à 1600 mm dans tous les bassins, descendant même en dessous de 1200 mm dans le bassin de la Mpanda à l'axe D.

Les autres années enregistrent une pluviométrie qui se situe entre ces deux extrêmes. A l'exception de la Mpanda à l'axe D, dont une bonne partie de la superficie se trouve dans la plaine, tous les bassins enregistrent une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 1600 mm. Le bassin de la

Mpanda voit sa pluviométrie diminuée de presque 300 mm entre Gatura et l'axe D.

Le bassin de la Kaburantwa, le plus grand de tous et s'étendant en grande partie dans les régions les plus arrosées, enregistre une hauteur moyenne d'eau de plus de 1800 mm par an.

La variabilité des précipitations est mise en évidence par le rapport des modules annuels au module annuel moyen. L'indice d'humidité varie ainsi :

Nyakagunda	0.73	à	1.33
Nyamagana	0.72	à	1.36
Muhira	0.79	à	1.25
Kaburantwa	0.82	à	1.21
Kagunuzi	0.84	à	1.29
Mpanda Gatura	0.83	à	1.32
Mpanda axe D	0.83	à	1.23

V.4. Caractéristiques de l'écoulement

Les données de débits utilisées dans ce chapitre couvrent la période 1972 – 1992 et proviennent de deux sources :

- dans le cadre d'une étude sur le potentiel hydroélectrique du Burundi, Lahmeyer International (Ingénieurs Conseil, RFA, 1983) a rassemblé des données de débits existant auprès des divers services nationaux. Comme les séries des débits ne se rapportaient qu'à une période limitée, Lahmeyer a effectué une reconstitution et une extension de débits mensuels des rivières principales du Burundi, entre 1972 et 1981 ;

- depuis 1980, l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU) effectue des relevés quotidiens aux stations limnimétriques des principales rivières du pays.

Les débits moyens journaliers en m^3/s sont calculés à partir de la hauteur d'eau lue à l'échelle des stations de jaugeage pour le jour considéré ; la lecture de l'échelle se fait deux fois par jour, généralement le matin et le soir. Les débits sont déterminés à partir des courbes de tarage donnant la relation entre les hauteurs d'eau et les débits.

Les équations de tarage définies par l'IGEBU sont reprises ci-dessous :

Nyakagunda	Q	$= 1.12(H + 0.41)^{1.10}$
Nyamagana	Q	$= 3.6(H)^{3.5}$
Muhira	Q	$= 13.4(H)^{1.45}$

Kaburantwa	Q	$= 14.2(H)^{1.6}$
Kagunuzi	Q	$= 26.21(H)^{0.69}$
Mpanda Gatura	Q	$= 5.6(H)^{1.93}$
Mpanda axe D	Q	$= 7.6(H)^{0.9}$

Les débits mensuels et annuels de la période 1972-1992 sont repris en annexe IV. Pour pouvoir comparer l'écoulement avec la précipitation pondérée des bassins versants, les débits moyens mensuels sont convertis en lame d'eau équivalente sur les bassins en utilisant la relation suivante :

$$Q(mm) = \frac{V(m^3)}{S(km^2)} \times 10^3$$

V = Volume d'eau ayant traversé la station limnimétrique

S = superficie du bassin

Compte tenu des prises d'irrigation qui se trouvent en amont des échelles limnimétriques, les débits moyens annuels des rivières Nyamagana et Muhira sont majorés respectivement de 1.2 et 0.6 m³/s. En effet, les différentes études réalisées dans cette partie de la plaine (SHER S.A., 1987) estiment à 0.6 m³/s le débit moyen annuel passant dans chaque canal d'irrigation, deux canaux d'irrigation étant installés sur la rivière Nyamagana et un sur la rivière Muhira.

Les débits annuels varient dans de larges limites :

Nyakagunda	2.04	à 5.29 m³/s	soit	499 à 1279	mm
Nyamagana	4.47	à 7.53 m³/s	soit	650 à 1093	mm
Muhira	4.26	à 6.43 m³/s	soit	574 à 866	mm
Kaburantwa	7.84	à 18.60 m³/s	soit	451 à 107	mm
Kagunuzi	4.96	à 11.47 m³/s	soit	355 à 821	mm
Mpanda Gatura	3.94	à 5.30 m³/s	soit	518 à 698	mm
Mpanda axe D	3.26	à 8.29 m³/s	soit	214 à 541	mm

Le tableau 5.3 fournit les débits mensuels (m³/s) et les lames écoulées (Q en mm) sur une année moyenne .

	Nyakagunda		Nyamagana		Muhira		Kaburantwa		Kagunuzi		Mpanda Gatura		Mpanda Axe D	
	1972-1992		1972-1992				1973-1992		1972-1992		1972-1987		1972-1987	
	Q	Q	Q	Q	Q	Lame	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
	m³/s	mm	m³/s	mm	m³/s	mm	m³/s	mm	m³/s	mm	m³/s	mm	m³/s	mm
S	2.07	41.66	3.19	38.17	3.89	43.00	11.04	52.25	6.59	38.99	4.00	43.22	3.28	17.69
O	2.32	48.21	3.45	42.63	4.11	46.95	11.54	56.47	6.97	42.57	4.40	49.12	3.69	20.59
N	3.04	60.99	4.23	50.55	4.97	55.01	12.73	60.26	8.48	50.18	4.67	50.43	5.03	27.12
D	2.93	60.85	4.28	52.92	5.09	58.18	13.34	65.28	8.81	53.87	4.56	50.88	5.12	28.52
J	2.78	57.71	4.50	55.55	5.21	59.60	13.87	67.84	9.23	56.43	4.61	51.47	5.29	29.47
F	2.82	52.93	4.60	51.31	5.27	54.39	14.36	63.45	9.17	50.63	4.81	48.52	5.48	27.58
M	3.21	66.73	5.05	62.43	5.88	67.20	15.34	75.03	9.56	58.45	5.18	57.85	6.02	33.56
A	3.39	68.08	5.94	71.00	6.59	72.88	17.28	81.81	11.11	65.70	6.13	66.20	8.25	44.49
M	3.31	68.67	5.54	68.43	6.21	71.02	16.50	80.73	11.03	67.40	5.95	66.39	6.85	38.16
J	2.57	51.54	4.16	49.74	4.93	54.54	13.72	64.95	8.50	50.25	4.18	45.15	4.02	21.69
J	2.04	42.39	3.20	39.47	4.04	46.15	11.93	58.37	6.36	37.63	3.82	42.65	3.21	17.86
A	1.86	38.56	3.10	38.30	3.75	42.89	10.99	53.79	5.82	34.42	3.72	41.53	3.11	17.33
Moy	**2.70**	**658.33**	**4.27**	**620.51**	**4.99**	**671.80**	**13.55**	**780.22**	**8.47**	**606.50**	**4.67**	**613.40**	**4.95**	**324.05**

Tableau 5.3 : Débits et lames écoulées équivalentes sur une année moyenne.

Nyakagunda : 2.70 m³/s soit 20.9 l/s/km²;

Nyamagana : 5.46 m³/s soit 25.2 l/s/km²;

Muhira : 5.59 m³/s soit 23.9 l/s/km²;

Kaburantwa : 13.55 m³/s soit 24.8 l/s/km²;

Kagunuzi : 8.47 m³/s soit 19.3 l/s/km²;

Mpanda Gatura : 4.67 m³/s soit 19.5 l/s/km² ;

Mpanda axe D : 4.95 m³/s soit 10.3 l/s/km²

Les débits moyens annuels sont supérieurs à 600 mm, sauf la Mpanda à l'axe D où le débit diminue de près de 300 mm par rapport à Gatura.

Le bassin de la Kagunuzi, qui se trouve dans les mêmes conditions climatiques que celui de la Kaburantwa, enregistre à l'exutoire un débit relativement faible, le barrage de Rwegura situé dans le bassin supérieur, modère certainement son débit .

Les coefficients d'écoulement (Q/P) varient de 0.24 (Mpanda axe D) à 0.45 à Nyamagana et Muhira.

Les bassins de la Nyamagana, Muhira et Kaburantwa ont des débits spécifiques proches (entre 23.91 et 25.23 l/s/km²); le bassin de la Kagunuzi a un débit spécifique relativement faible 19.5 l/s/km² pour la raison évoquée ci-haut (barrage de Rwegura).

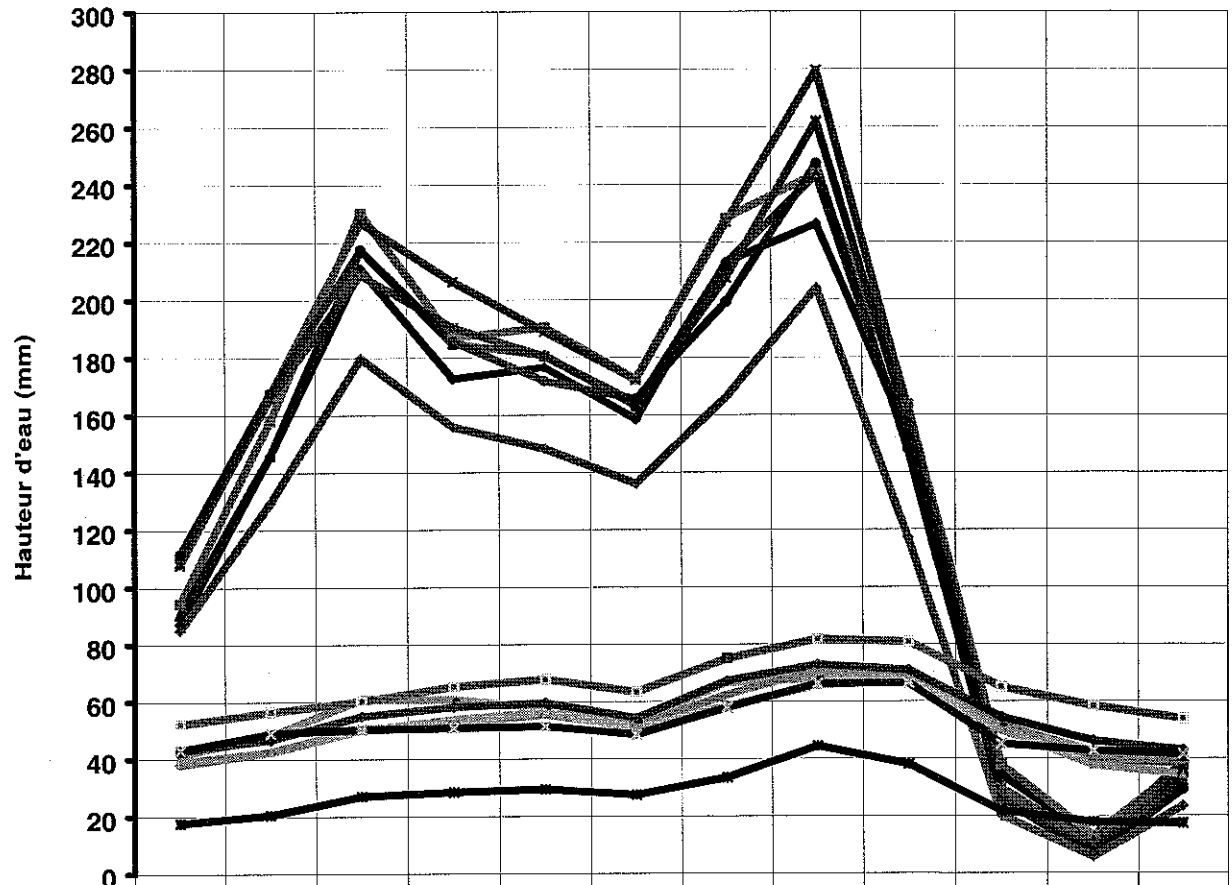
De Gatura à l'axe D, le débit spécifique de la Mpanda passe de 19.5 à 10.3 l/s/km². Entre les deux échelles, le bassin est en grande partie situé dans la plaine, sa superficie passe de 240 à 480.7 km² et la pluviométrie moyenne annuelle diminue de près 300 mm.

La fig.V.4 montre la variation de la pluviométrie et de débits moyens mensuels des bassins ; on observe que les débits augmentent sensiblement à partir du mois d'octobre.

Le bassin de la Nyakagunda, le plus petit (129 km²) affiche son 1er maximum de débit au mois de novembre et correspond au 1er maximum des précipitations.

Pour les autres rivières, les débits continuent à augmenter et le 1er maximum de débits est atteint en janvier, il est décalé de deux mois par rapport au 1er maximum des précipitations. En février, la diminution nette de la pluviométrie est marquée par une diminution de débits à l'exutoire ; les mois de mars, avril et mai enregistrent des débits très élevés, avec un 2ème maximum en avril. C'est la période des crues et inondations.

Alors que le mois de mai enregistre une baisse sensible de la pluviométrie, les débits demeurent élevés et leur diminution s'amorce à partir du mois de juin, début de la période de tarissement qui se prolonge jusqu'à la fin du mois d'août.



	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P Nyakagunda	87	146	211	173	177	159	213	226	153	34	12	34
P Nyamagana	94	158	230	187	190	172	228	244	164	38	13	38
P Muhira	90	146	217	185	181	163	213	243	149	25	11	36
P Kaburantwa	108	167	227	206	189	172	227	280	162	30	10	39
P Kagunuzi	109	166	209	190	180	164	208	262	157	27	8	32
P Gatura	112	168	217	186	172	165	199	247	148	26	6	29
P axe D	85	129	180	156	148	136	166	204	117	20	6	23
Q Nyakagunda	42	48	61	61	58	53	67	68	69	52	42	39
Q Nyamagana	38	43	51	53	56	51	62	71	68	50	39	38
Q Muhira	43	47	55	58	60	54	67	73	71	55	46	43
Q Kaburantwa	52	56	60	65	68	63	75	82	81	65	58	54
Q Kagunuzi	39	43	50	54	56	51	58	66	67	50	38	34
Q Gatura	43	49	50	51	51	49	58	66	66	45	43	42
Q axe D	18	21	27	29	29	28	34	44	38	22	18	17

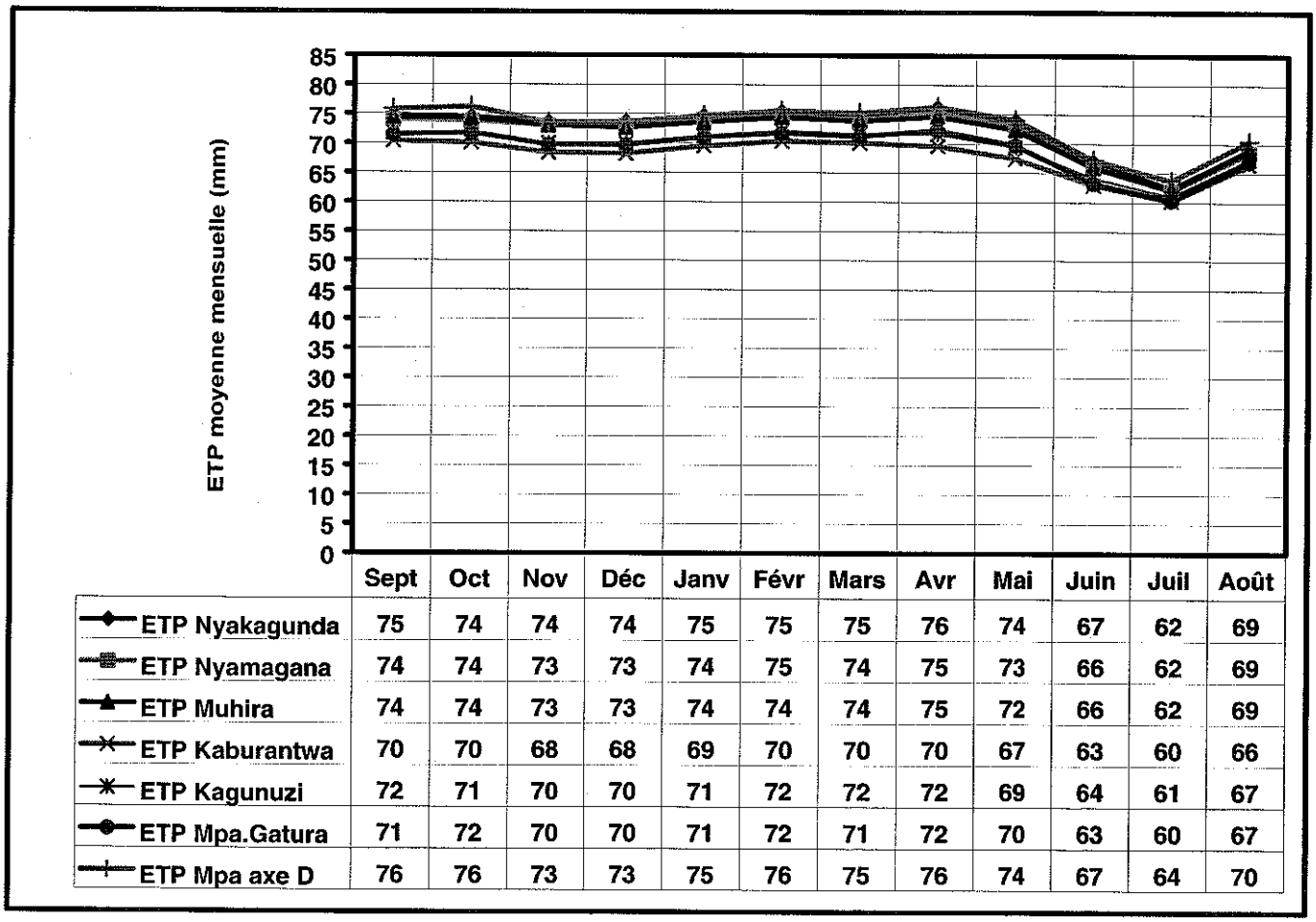
Fig.V.4 : Variation de la pluviométrie et de débits moyens mensuels : année moyenne 1972-1992.

V.5. Paramètres climatiques des bassins

Pour ne prendre en compte que l'écoulement correspondant aux pluies effectivement tombées durant la période sur laquelle s'étend le calcul, les paramètres climatiques sont déterminés par année hydrologique. Ils sont calculés au pas de temps mensuel avec la méthode de Thornthwaite.

V.5.1. Evapotranspiration

A cause de la faible variation des températures, la variation mensuelle de l' ETP reste elle aussi faible ; les valeurs légèrement plus élevées sont enregistrées en octobre et avril, les plus basses en juillet . La fig.V.5 montre la variation mensuelle de L'ETP sur une année moyenne. Les valeurs de l'ETP mensuelle et annuelle de la période étudiée sont reprises en annexe V.1.



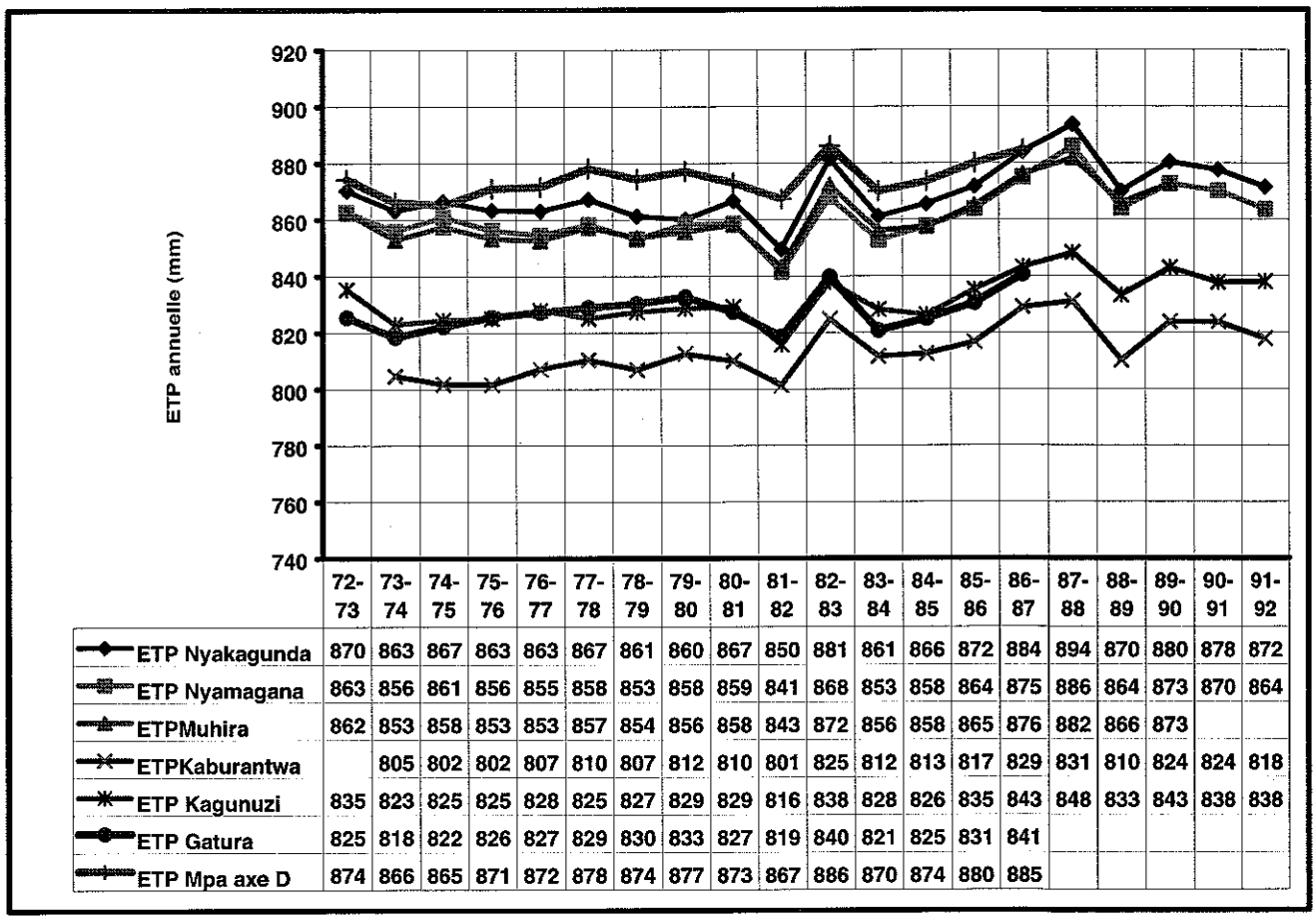
	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
ETP Nyakagunda	75	74	74	74	75	75	75	76	74	67	62	69
ETP Nyamagana	74	74	73	73	74	75	74	75	73	66	62	69
ETP Muhira	74	74	73	73	74	74	74	75	72	66	62	69
ETP Kaburantwa	70	70	68	68	69	70	70	70	67	63	60	66
ETP Kagunuzi	72	71	70	70	71	72	72	72	69	64	61	67
ETP Mpa.Gatura	71	72	70	70	71	72	71	72	70	63	60	67
ETP Mpa axe D	76	76	73	73	75	76	75	76	74	67	64	70

Fig.V.5 : Variation moyenne mensuelle de l'ETP (1972-1992).

Les valeurs moyennes mensuelles les plus élevées sont enregistrées dans le bassin de la Mpanda à l'axe D, elles sont comprises entre 63.5 mm (juillet) et 76.3 mm (avril). Le bassin de la Kaburantwa est le plus froid, avec des valeurs moyennes comprises entre 60.3 mm (juillet) et 70.4 mm (septembre). Les

autres bassins enregistrent des valeurs de l'ETP comprises entre celles de ces deux bassins.

La variation annuelle de l'ETP est repris à la fig.V.6. Les bassins de la Nyakagunda, Nyamagana, Muhira et Mpanda à l'axe D enregistrent une ETP annuelle toujours supérieure à 840 mm. Les bassins de Kaburantwa, Kagunuzi et Mpanda à Gatura qui couvrent des régions plus froides, enregistrent une ETP annuelle qui dépasse rarement 840 mm.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
ETP Nyakagunda	870	863	867	863	863	867	861	860	867	850	881	861	866	872	884	894	870	880	878	872
ETP Nyamagana	863	856	861	856	855	858	853	858	859	841	868	853	858	864	875	886	864	873	870	864
ETPMuhira	862	853	858	853	853	857	854	856	858	843	872	856	858	865	876	882	866	873		
ETPKaburantwa		805	802	802	807	810	807	812	810	801	825	812	813	817	829	831	810	824	824	818
ETP Kagunuzi	835	823	825	825	828	825	827	829	829	816	838	828	826	835	843	848	833	843	838	838
ETP Gatura	825	818	822	826	827	829	830	833	827	819	840	821	825	831	841					
ETP Mpa axe D	874	866	865	871	872	878	874	877	873	867	886	870	874	880	885					

Fig.V.6 : Variation annuelle de l'ETP : période 1972-1992.

Une tendance générale de l'augmentation de l'ETP est observée entre 82-83 et 87-88 et les valeurs les plus élevées sont calculées en 87-88.

Le tableau 5.4 reprend les valeurs moyennes mensuelles de l'ETP et ETR. On observe que l'ETR mensuelle est toujours égale à l'ETP entre les mois d'octobre et juin.

Au mois de septembre, l'ETR est légèrement inférieure à l'ETP, durant quelques années de la période, ce mois n'a pas enregistré de précipitations suffisantes pour satisfaire l'évapotranspiration.

Durant les mois de juillet et août, le stock d'humidité du sol est insuffisant pour combler l'insuffisance des précipitations et l'ETR reste inférieure à l'ETP.

		Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août		Total
ETP Nyakagunda		75	74	74	74	75	75	75	76	74	67	62	69		869
ETR Nyakagunda		66	74	74	74	75	75	75	76	74	67	56	42		826
ETP Nyamagana		74	74	73	73	74	75	74	75	73	66	62	69		862
ETR Nyamagana		68	74	73	73	74	75	74	75	73	66	57	45		826
ETP Muhira		74	74	73	73	74	74	74	75	72	66	62	69		860
ETR Muhira		67	74	73	73	74	74	74	75	72	66	54	40		816
ETP Kaburantwa		70	70	68	68	69	70	70	70	67	63	60	66		814
ETR Kaburantwa		67	70	68	68	69	70	70	70	67	63	54	44		781
ETP Kagunuzi		72	71	70	70	71	72	72	72	69	64	61	67		832
ETR Kagunuzi		70	71	70	70	71	72	72	72	69	64	54	37		793
ETP Mpa.Gatura		71	72	69	69	71	72	71	72	70	63	60	67		828
ETR Gatura		65	72	69	69	71	72	71	72	70	63	54	34		783
ETP Mpa axe D		76	76	73	73	75	76	75	76	74	67	64	71		874
ETR Mpa axe D		67	75	73	73	75	76	75	76	74	67	48	28		805

Tableau 5.4 : ETP et ETR moyennes mensuelles.

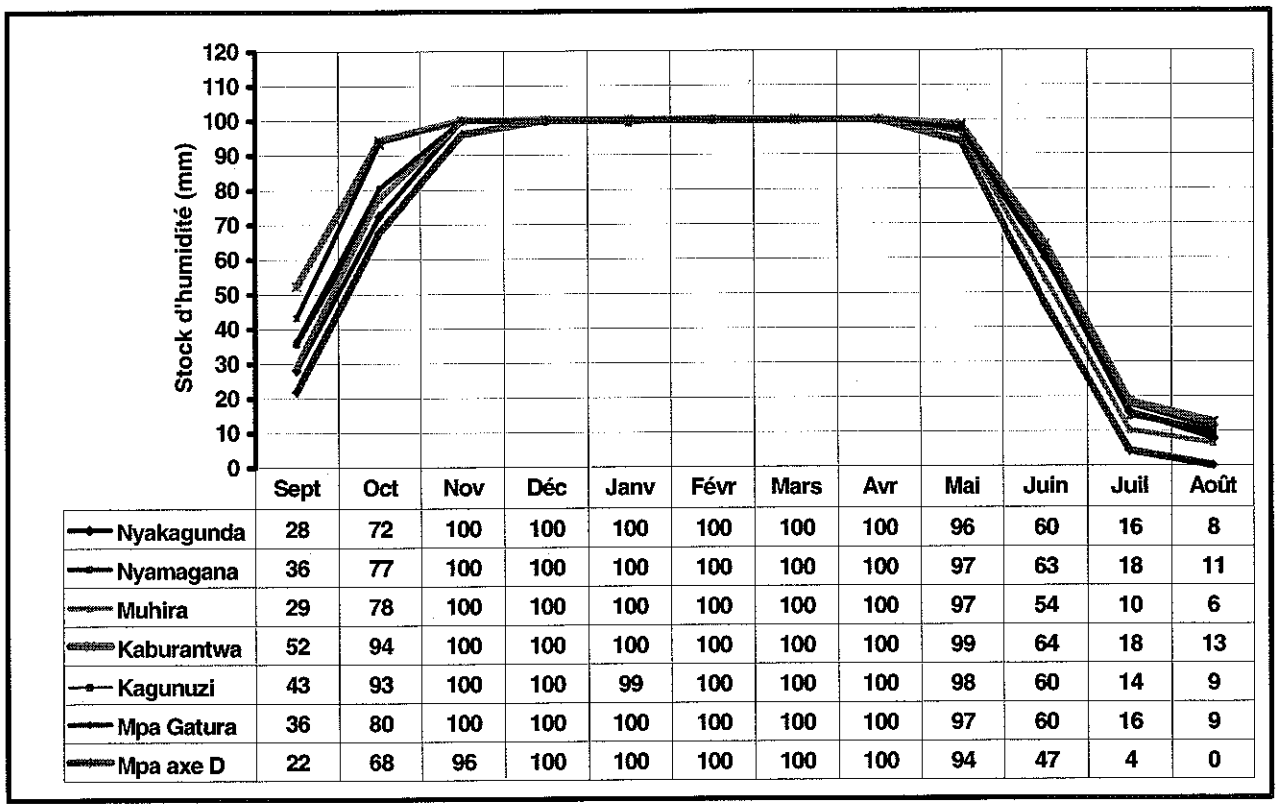
L'évapotranspiration est satisfaite à 92% (ETR/ETP) dans le bassin de la Mpanda à l'axe D, 95% à Nyakagunda, Muhira et Kagunuzi et 92% à Mpanda axe D.

V.5.2. Stock d'humidité du sol

Les valeurs du stock d'humidité mensuelle sont reprises en annexe V.2. Le stock d'humidité se reconstitue habituellement dès le mois de septembre et le niveau maximal (100 mm) est atteint au plus tard en novembre pour s'y maintenir jusqu'en mai. Cependant, à cause de l'irrégularité des précipitations, le stock peut se reconstituer tard (en octobre) et son niveau baisser dès le mois de mai.

A partir du mois de juin, le stock se vide progressivement, seules les années exceptionnellement pluvieuses en juin maintiennent leur stock d'humidité maximal, ce sont : 73-74, 90-91 et 91-92 à Nyakagunda et Nyamagana, 73-74 et 90-91 à Kaburantwa, 73-74 à Kagunuzi et Muhira .

Aux mois de juillet et août, la majorité des années affichent un stock d'humidité nul. La fig.V.7 reprend l'évolution du stock moyen d'humidité mensuel.



	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Nyakagunda	28	72	100	100	100	100	100	100	96	60	16	8
Nyamagana	36	77	100	100	100	100	100	100	97	63	18	11
Muhira	29	78	100	100	100	100	100	100	97	54	10	6
Kaburantwa	52	94	100	100	100	100	100	100	99	64	18	13
Kagunuzi	43	93	100	100	99	100	100	100	98	60	14	9
Mpa Gatura	36	80	100	100	100	100	100	100	97	60	16	9
Mpa axe D	22	68	96	100	100	100	100	100	94	47	4	0

Fig.V.7 : Stock moyen mensuel d'humidité.

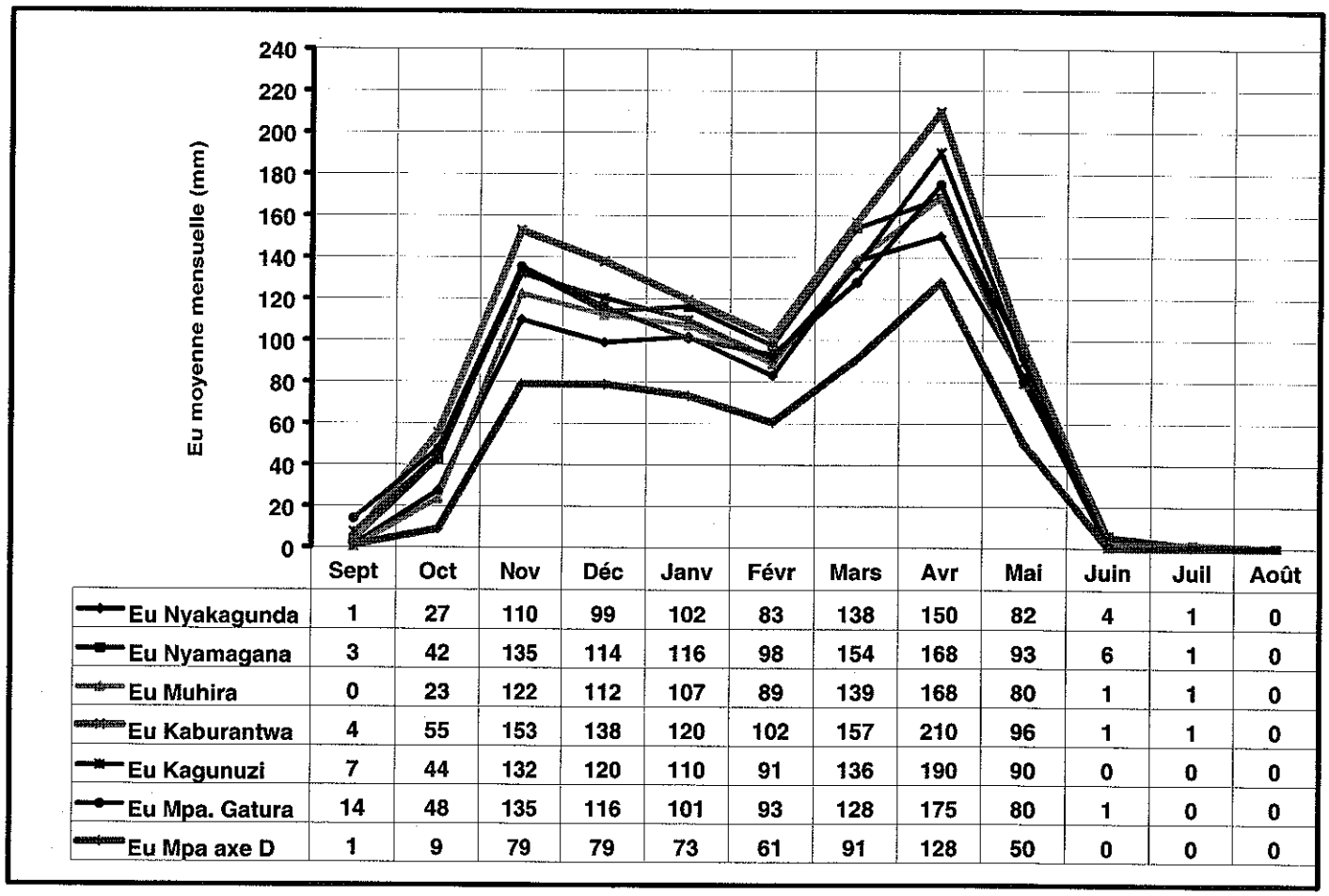
V.5.3. Eau utile

Les hauteurs mensuelles d'eau utile des bassins sont fournies en annexe V.3. A l'exception du bassin de la Mpanda à l'axe D, l'eau utile (Eu) est généralement disponible dès le mois d'octobre et reste présente jusqu'au mois de mai. Exceptionnellement, on peut enregistrer de l'eau utile dès le mois de septembre quand ce dernier est très pluvieux et en juin quand la saison pluvieuse se prolonge.

La fig.V.8 affiche les hauteurs moyennes mensuelles :

- dans le bassin supérieur, les mois les plus pluvieux (novembre, décembre janvier, mars et avril) enregistrent des hauteurs d'eau moyennes supérieures à 100 mm avec des maxima en avril compris entre 150 mm (Nyakagunda) et 210 mm (Kaburantwa) ;

- à Mpanda à l'axe D, l'eau utile est présente entre les mois de novembre et mai et le mois avril est le seul de l'année qui enregistre une hauteur moyenne d'eau utile supérieure à 100 mm.



	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Eu Nyakagunda	1	27	110	99	102	83	138	150	82	4	1	0
Eu Nyamagana	3	42	135	114	116	98	154	168	93	6	1	0
Eu Muhira	0	23	122	112	107	89	139	168	80	1	1	0
Eu Kaburantwa	4	55	153	138	120	102	157	210	96	1	1	0
Eu Kagunuzi	7	44	132	120	110	91	136	190	90	0	0	0
Eu Mpa. Gatura	14	48	135	116	101	93	128	175	80	1	0	0
Eu Mpa axe D	1	9	79	79	73	61	91	128	50	0	0	0

Fig.V.8 : Eu moyenne mensuelle (mm).

La hauteur annuelle d'eau utile varie dans de larges limites :

Nyakagunda (72-92) : de 365 à 1213 mm, Eu_{moy} = 798 mm soit 49 % de P
Nyamagana (72-92) : de 470 à 1427 mm, Eu_{moy} = 931 mm soit 53 % de P
Muhira (72-90) : de 497 à 1159 mm, Eu_{moy} = 844 mm soit 51 % de P
Kaburantwa (73-92) : de 756 à 1326 mm, Eu_{moy} = 1038 mm soit 57 % de P
Kagunuzi (72-92) : de 365 à 1213 mm, Eu_{moy} = 798 mm soit 47 % de P
Mpanda à Gatura (72-87) : de 594 à 1363 mm, Eu_{moy} = 892 mm soit 53 % de P
Mpanda à l 'axe D (72-87) : de 347 à 818 mm, Eu_{moy} = 798 mm soit 49 % de P

V.6. Bilans hydrologiques

Le bilan hydrologique d'un bassin peut être exprimé par la relation suivante:

$P = Q + ETR + \Delta S + \Delta R + \varepsilon$

où :

P = la précipitation moyenne annuelle (mm)

Q = l'écoulement moyen annuel (mm)

ETR = l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm)

ΔS = la variation de stock d'humidité du sol (mm)

ΔR = la variation annuelle des réserves d'eau souterraine (mm) (accumulation ou perte d'eaux souterraines)

ε = l'écart de fermeture (écoulement souterrain vers ou en dehors du bassin) ou erreurs de mesure des termes du bilan (mm).

Cette équation n'est en principe valable que si coïncident les bassins hydrologique et hydrogéologique, le premier étant limité par les crêtes topographiques, le deuxième par les crêtes piézométriques fixant les écoulements souterrains .

Pour chacun des bassins, nous allons d'abord établir les bilans hydrologiques sur toute la période considérée sans le terme ΔR, nous estimerons ensuite ce terme pour les années hydrologiques dont nous disposons les débits journaliers.

V.6.1. Bassin de la Nyakagunda

Le bassin de la Nyakagunda est le plus petit (142 km²) et le moins élevé des bassins étudiés. La rivière, longue de 30,4 km, prend source à 1850 m d'altitude et a un sens d'écoulement N-S. L'échelle limnimétrique se trouve à 5,9 km de sa confluence avec la Rusizi.

La fig.V.9 reprend brièvement les paramètres physiographiques et la géologie du bassin. De l'amont vers l'aval, la rivière draine les formations géologiques suivantes :

- la formation de Rugendo (Rg), localisée sur la crête, est composée de quartzites blancs stratifiés avec intercalations phylliteuses, lentilles de

quartzites gris foncé et de conglomérats grossiers riches en oxyde de fer, avec en haut des phyllites gris vert clair, très altérées ;

- le complexe de Ruhanga (Rn), situé dans les contreforts dominant la plaine, est formé principalement de pélites avec de nombreuses amphibolites, des phyllites carbonatées ainsi que quelques niveaux quartzitiques ;

- les alluvions de la Nyakagunda et les dépôts fluvio-lacustres de la Rusizi.

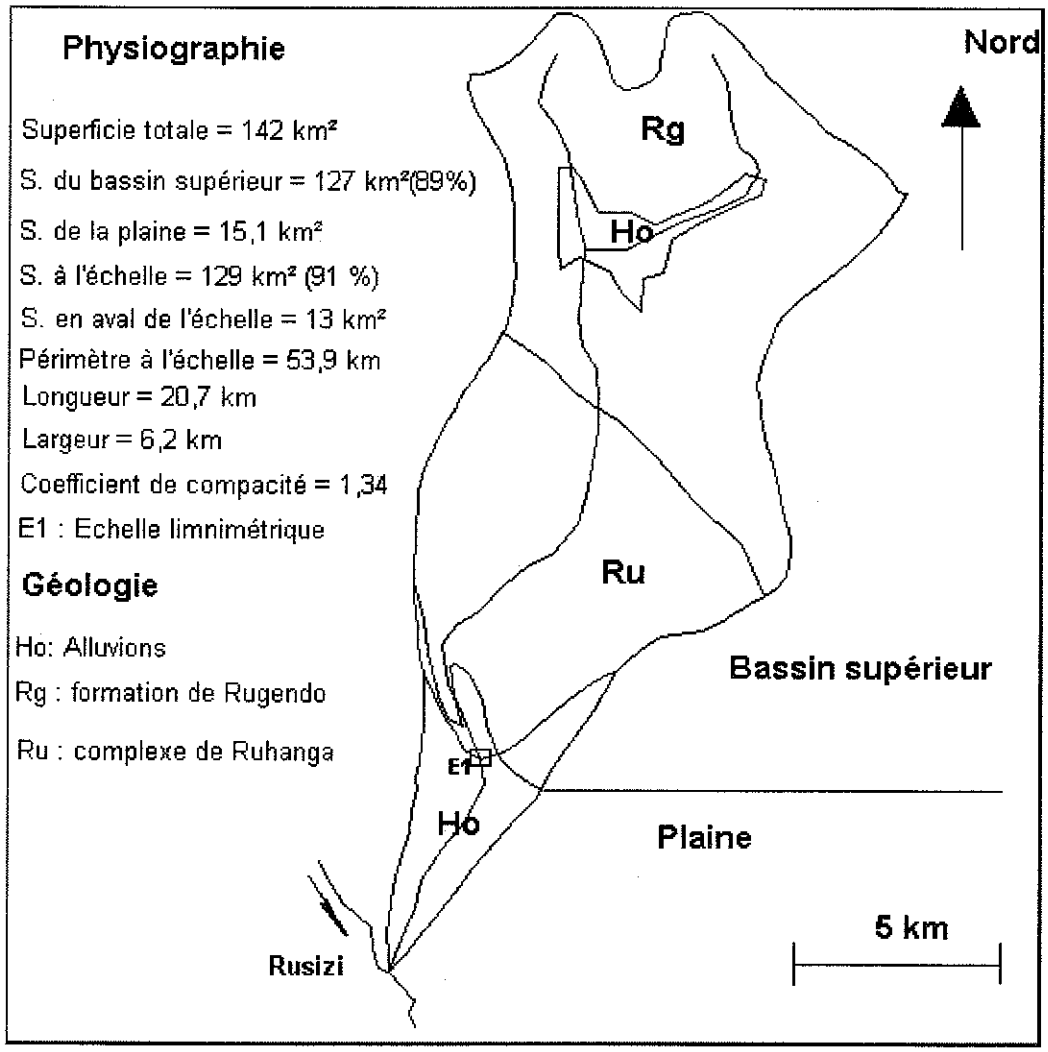


Fig. V.9 : Physiographie et géologie de la Nyakagunda.

V.6.1.1. *Bilans annuels*

Le tableau 5.5 fournit les bilans hydrologiques annuels de la Nyakagunda entre 1972 et 1992. La fig.V.10 présente la variation de ces paramètres pendant la période considérée. Durant les années moins pluvieuses (P < 1400 mm) : 74-75, 75-76 et 76-77, la hauteur de l'eau utile ne dépasse pas 550 mm. Les équations du bilan de cette période sont :

74-75: P - ETR - Q - ΔS = 1186 - 797 - 518 + 49 = - 80 mm
75-76: P - ETR - Q - ΔS = 1221 - 856 - 518 - 0 = - 153 mm
76-77: P - ETR - Q - ΔS = 1359 - 821 - 537 - 0 = 1 mm

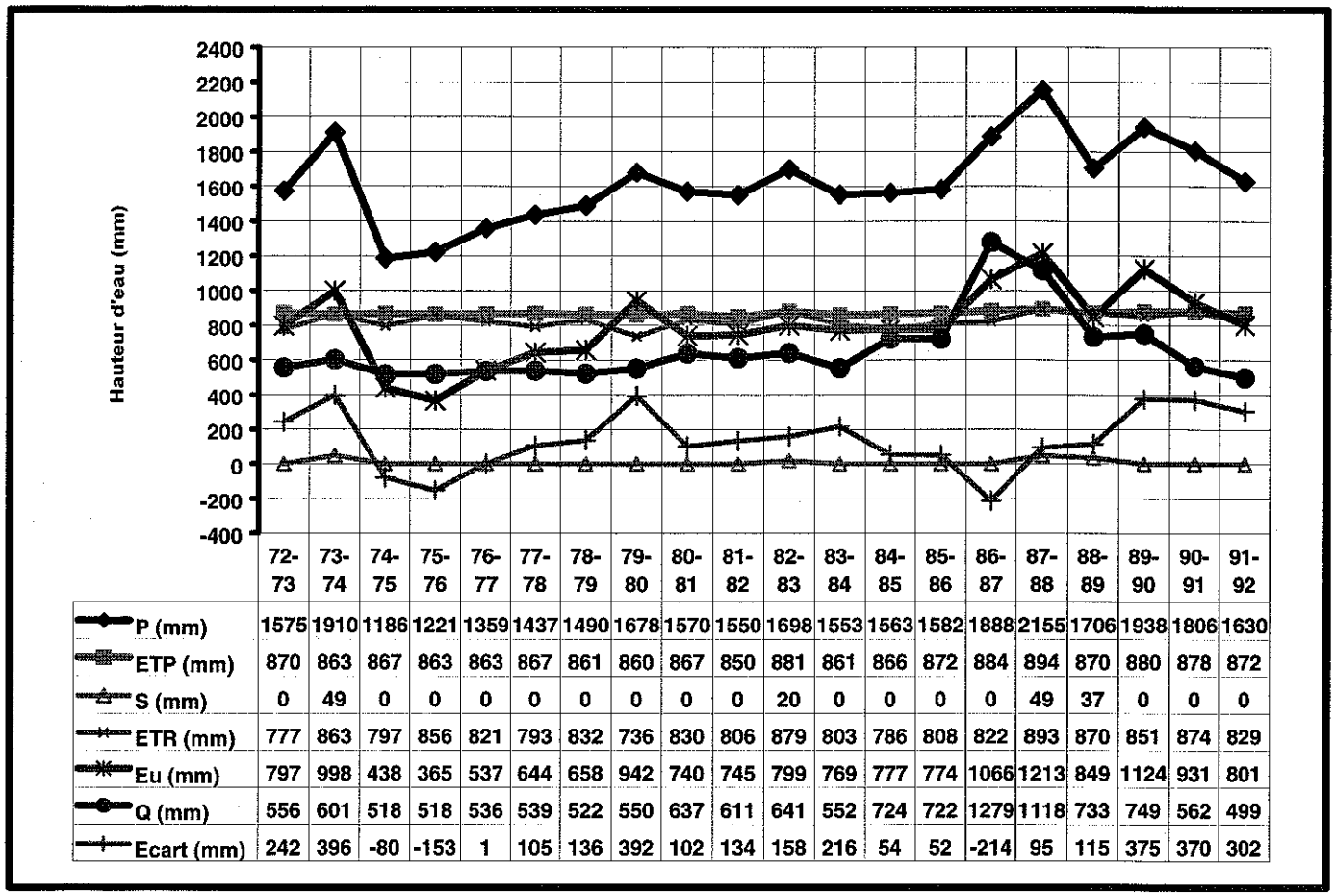
Les bilans des années 74-75 et 75-76 sont excédentaires (Q > Eu). L'excédent d'écoulement provient des réserves du bassin supérieur, puisque le bassin contigu de la Nyamagana présente lui aussi un excédent d'écoulement pendant la même période.

Année		P	T	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Eu-Q
72-73		(mm)	(°c)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
72-73		1575	20.4	870	0	0	777	797	556	242
73-74		1910	20.3	863	49	49	863	998	601	396
74-75		1186	20.4	867	0	-49	797	**438**	518	**-80**
75-76		1221	20.3	863	0	0	856	**365**	518	**-153**
76-77		1359	20.2	863	0	0	821	**537**	536	**1**
77-78		1437	20.2	867	0	0	793	644	539	105
78-79		1490	20.2	861	0	0	832	658	522	136
79-80		1678	20.2	860	0	0	736	942	550	392
80-81		1570	20.4	867	0	0	830	740	637	102
81-82		1550	19.8	850	0	0	806	745	611	134
82-83		1698	20.8	881	20	20	879	799	641	158
83-84		1553	20.1	861	0	-20	803	769	552	216
84-85		1563	20.3	866	0	0	786	777	724	54
85-86		1582	20.6	872	0	0	808	774	722	52
86-87		1888	20.9	884	0	0	822	1066	**1279**	**-214**
87-88		2155	**21.2**	**894**	**49**	**49**	**893**	1213	1118	95
88-89		1706	20.6	870	37	-12	870	849	733	115
89-90		1938	20.8	880	0	-37	851	1124	749	375
90-91		1806	20.7	878	0	0	874	931	562	370
91-92		1630	20.6	872	0	0	829	801	499	302
Moy		**1625**	**20.4**	**869**	**8**	**0**	**826**	**798**	**658**	**140**
Max		**2155**	**21.2**	**894**	**49**	**49**	**893**	**1213**	**1279**	**396**
Min		**1186**	**19.8**	**850**	**0**	**-49**	**736**	**365**	**499**	**-214**

Tableau 5.5 : Bilans hydrologiques annuels de la Nyakagunda (1972-1992).

Toutes les autres années enregistrent une hauteur d'eau utile supérieure à 600 mm et présentent systématiquement un déficit d'écoulement, à l'exception de l'année 86-87 qui a un excédent d'écoulement (-219 mm) à cause de la lame écoulée (1279 mm) enregistrée durant cette année.

Durant toute la période, l'eau utile (Eu) est comprise entre 365 mm (75 -76) et 1213 mm (87-88) et la lame d'eau écoulée entre 499 mm (91-92) et 1279 mm (86-87).



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	1575	1910	1186	1221	1359	1437	1490	1678	1570	1550	1698	1553	1563	1582	1888	2155	1706	1938	1806	1630
ETP (mm)	870	863	867	863	863	867	861	860	867	850	881	861	866	872	884	894	870	880	878	872
S (mm)	0	49	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	49	37	0	0	0
ETR (mm)	777	863	797	856	821	793	832	736	830	806	879	803	786	808	822	893	870	851	874	829
Eu (mm)	797	998	438	365	537	644	658	942	740	745	799	769	777	774	1066	1213	849	1124	931	801
Q (mm)	556	601	518	518	536	539	522	550	637	611	641	552	724	722	1279	1118	733	749	562	499
Ecart (mm)	242	396	-80	-153	1	105	136	392	102	134	158	216	54	52	-214	95	115	375	370	302

Fig.V.10 : Variation annuelle des paramètres des bilans.

Les paramètres du bilan moyen annuel (1972-1992) sont :

P = 1625 mm

ETR = 827 mm soit 51% de P

Q = 658 mm soit 40% de P

Eu = 798 mm soit 49% de P

ΔS = 0 mm

L'équation du bilan moyen annuel entre 1972 et 1992 s'écrit :

P - ETR - ΔS - Q = 1625 - 827 - 0 - 658 = 140 mm .

L'écart moyen de fermeture (ε) est égal à 140 mm, soit 9% des précipitations.

V.6.1.2. *Estimation des réserves*

L'estimation des réserves d'eaux souterraines peut se faire par l'interprétation des courbes de tarissement qui représentent la décroissance du débit en fonction du temps et répondent à une loi de type $Q = Q_0 e^{-\alpha t}$ (formule de maillet) avec :

Q = débit au temps t (m^3/s)

Q_0 = débit au temps t_0, début du tarissement (m^3/s)

α = coefficient de tarissement en $jours^{-1}$ (j^{-1})

t = temps écoulé depuis le début de tarissement (jours)

Exprimée en diagramme semi-logarithmique, la courbe de tarissement se transforme en une droite dont le coefficient angulaire vaut 0.4343α, on peut donc calculer α, paramètre caractéristique de l'aquifère.

L'intégrale de la formule de Maillet, calculée entre t_0=0 (début de tarissement) et l'infini, donne le volume des débits à l'exutoire correspondant au vidange total du réservoir, c'est-à-dire :

$$V_{rés} = \int_0^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} = \frac{Q_0}{\alpha}$$

L'intégration dans des limites de temps déterminés donne une estimation de la variation de l'aquifère pendant la période considérée.

La succession de terrains de nature différente donne lieu à la superposition d'aquifères ayant des caractéristiques hydrodynamiques spécifiques et dont les vidanges successives se traduisent par une courbe de tarissement en ligne brisée, permettant la détermination de différents coefficients de tarissement des aquifères.

Les réserves du bassin supérieur de la Nyakagunda ont été calculées pour les années qui disposent des débits journaliers. Ce sont 81-82, 82-83, 83-84, 84-85 et 85-86. Les courbes de tarissement de la Nyakagunda, établies entre les

mois de juin et août, période où la rivière est en phase de tarissement se reprises en annexe VI.1.

L'allure générale de toutes les courbes montre une évolution « en escalier », avec des périodes où le débit reste constant pendant plusieurs jours, rendant difficile le calcul de coefficients.

Les coefficients α calculés peuvent être groupés en deux catégories (tableau 5.6) :

- le coefficient α_1, compris entre 0.00902 et 0.01419 j^{-1}, caractérise les niveaux superficiels altérés ;

- le coefficient α_2 compris entre 0,00367 et 0,00526 j^{-1} représente les horizons aquifères inférieurs moins fracturés qui assurent le débit de base de la rivière jusqu'à la reprise des précipitations.

	81-82	**82-83**	**83-84**	**84-85**	**85-86**
α_1	0.00999	0.00946	0.01419	0.01004	0.00902
α_2	0.00462	0.00367	0.00401	0.00428	0.00526

Tableau 5.6 : Coefficients de tarissement de la Nyakagunda

Les réserves de la Nyakagunda et leur variation annuelle, calculées entre 81-82 et 85-86 sont reprises au tableau 5.7. De 82-83 à 85-86, les bilans hydrogéologiques annuels s'écrivent :

82-83: P- ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1698 - 879 - 641 - 20 + 44 = 202 mm
83-84: P- ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1553 - 803 - 552 +20 + 67 = 285 mm
84-85: P- ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1563 - 786 - 724 - 0 - 87 = -34 mm
85-86: P- ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1582 - 808 - 722 - 0 - 11 = 41 mm

Le volume des réserves se situe entre 3.3 x 10^7 m³ (83-84) et 4.7 x 10^7 m³ (81-82) soit une hauteur d'eau comprise entre 256 et 368 mm, la moyenne annuelle est égale à 4.1 x 10^7 m³ soit une hauteur moyenne de 319 mm.

L'équation du bilan moyen annuel de ces quatre années s'écrit :

82-86: P- ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1599 - 819 – 660 - 0 + 3 = 123 mm.

Année	P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Vol.R	R	ΔR	ε
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m^3	mm	mm	mm
		initiales								finales		
81-82	1550	?	850	0	0	806	745	611	4.7E+07	368		
82-83	1698	368	881	20	20	879	799	641	4.2E+07	323	-44	202
83-84	1553	323	861	0	-20	803	769	552	3.3E+07	256	-67	285
84-85	1563	256	866	0	0	786	777	724	4.4E+07	343	87	-34
85-86	1582	343	872	0	0	808	774	722	4.6E+07	354	11	41
Moy	**1599**	**323**	**870**	**5**	**0**	**819**	**780**	**660**	**4.1E+07**	**319**	**-3**	**123**
			54%	**0%**	**0%**	**51%**	**49%**	**41%**		**20%**	**0%**	**8%**

Tableau 5.7: Bilans hydrogéologiques de la Nyakagunda

On observe que ΔS est nulle et que le terme ΔR est négligeable par rapport aux autres termes du bilan. Le déficit moyen d'écoulement est égal à 123 mm soit 8% de P et 16% de l'Eu.

Pour rappel, l'équation obtenue sans tenir compte de la variation de réserves (par manque de courbes de tarissement) s'écrit :

$$P - ETR - \Delta S - Q = \varepsilon = 1625 - 827 - 0 - 658 = 140 \text{ mm}$$

Dans le bassin de la Nyakagunda, on retient que :

- si l'eau utile est inférieure à 500 mm / an, les bilans sont excédentaires et théoriquement, les nappes de la plaine ne sont pas alimentées par le bassin supérieur ;

- si l'eau utile est supérieur à 500 mm / an, les bilans hydrologiques sont déficitaires ($\varepsilon > 0$), le déficit d'écoulement passe dans les nappes du bassin supérieur et dans celles de la moyenne Rusizi. En bas des contreforts, entre la Nyakagunda et la Nyamagana, se trouve le petit lac Dogodogo qui n'a pas de communication, ni avec la Rusizi, ni avec les deux rivières et il est fort probable qu'une partie du déficit se retrouve dans ce lac ;

- les réserves du bassin supérieur sont comprises entre 3.07×10^7 m³ et 4.40×10^7 m³, soit une hauteur d'eau comprise entre 256 et 354 mm.

V.6.2. Bassin de la Nyamagana

La rivière Nyamagana prend source à 2200 m d'altitude et rejoint la Rusizi à 815 m. Les bilans hydrologiques sont établis à l'échelle limnimétrique installée au niveau du pont de la Route Bujumbura-Cibitoke (RN5), à 3.1 km de la Rusizi. Le débit passant par les canaux d'irrigation, rapporté à la superficie du bassin à l'échelle, équivaut à une lame d'eau de 175 mm par an.

La fig.V.11 rappelle les paramètres physiographiques et la géologie du bassin.

Le bassin supérieur est constitué par :

- les formations de Rugendo et Mabayi qui sont composées de quartzites stratifiés, grès fins à grossiers, lentilles microconglomératiques et des phyllites très altérées. Ces deux formations occupent 104.51 km² soit 54% de la superficie du bassin supérieur ;

- les formations de Ngozi et Murwi composées de pélites, gréso-pélites, phyllites et micaschistes avec quelques intercalations de niveaux graphiteux. Elles s'étendent sur une superficie de 42.7 km² (22%) ;

- le complexe de Ruhanga composé de pélites, des phyllites carbonatées et quelques niveaux quartzitiques, il occupe 33 km² soit 17% de la superficie du bassin supérieur ;

- la plaine alluviale de Buhoro s'étend sur 12 km² et s'est développée à la confluence de certains affluents de la Nyamagana ;

Les dépôts fluvio-lacustes de la plaine occupent 24,5 km², soit 11,2% de la superficie totale du bassin .

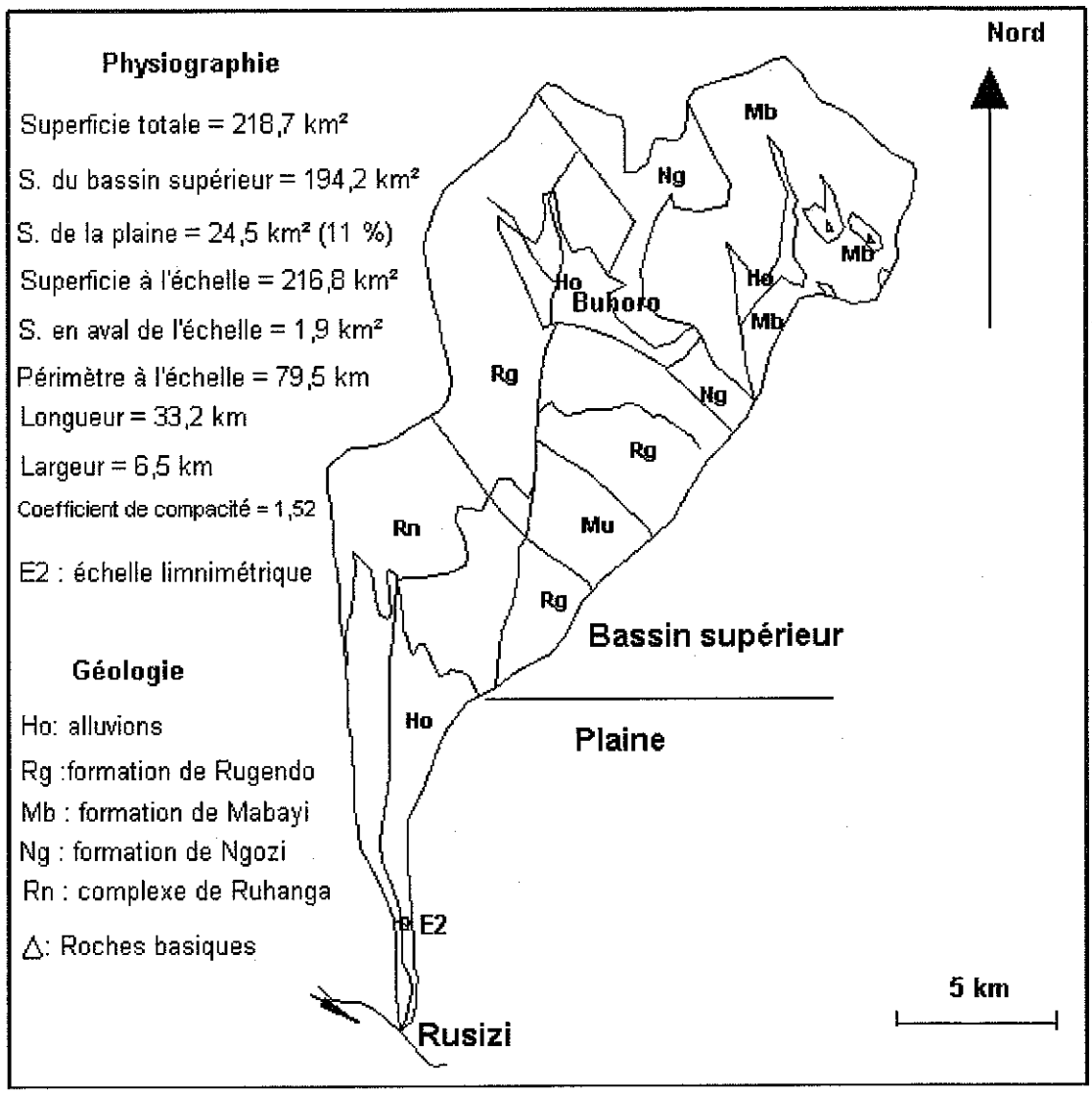


Fig. V.11 : Physiographie et géologie de la Nyamagana.

V.6.2.1. *Bilans annuels*

Les bilans annuels de la Nyamagana entre 1972 et 1992 sont repris au tableau 5.8 et la fig.V.12 fournit la variation des paramètres hydrologiques. L'eau utile est comprise entre 470 mm (75 -76) et 1427 mm (87-88). La lame écoulée($Q + Q_{irrigation}$) est comprise entre 650 mm (91-92) et 1092 mm (87-88).

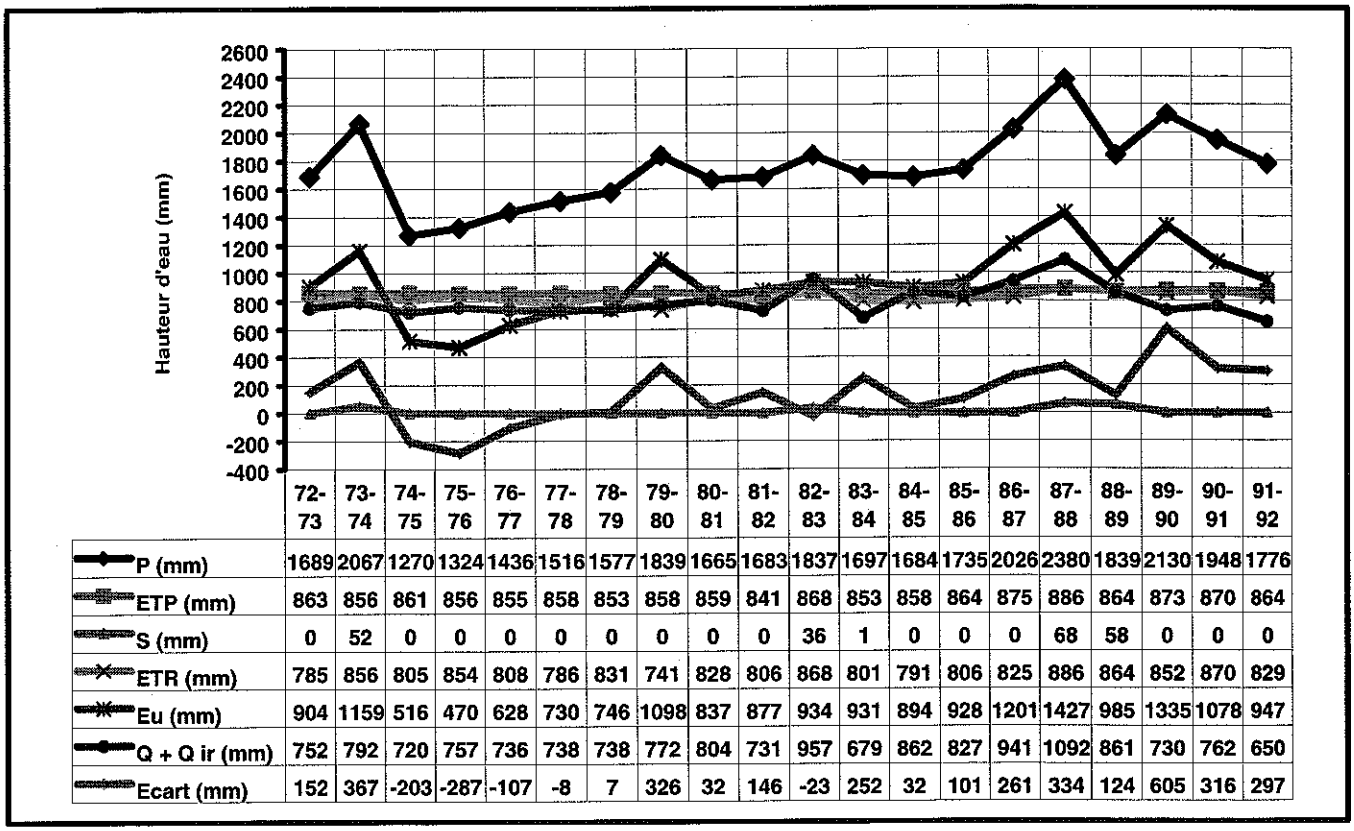
Durant les années moins pluvieuses (1200 < P <1600 mm), entre 74-75 et 78-79, l'eau utile est comprise entre 470 et 746 mm et la lame écoulée entre 720 et 757 mm. Les équations du bilan sont :

74-75: P - ETR - Q - ΔS = 1270 - 805 - 720 + 52 = - 203 mm
75-76: P - ETR - Q - ΔS = 1324 - 854 - 757 - 0 = - 287 mm
76-77: P - ETR - Q - ΔS = 1436 - 808 - 736 - 0 = - 108 mm
77-78: P - ETR - Q - ΔS = 1516 - 786 - 738 - 0 = - 8 mm
78-79: P - ETR - Q - ΔS = 1577 - 831 - 738 - 0 = 7 mm

Année		P	T	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Q irig	Q + Q ir	Eu-Q
		(mm)	(°c)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
72-73		1689	20.2	863	0	0	785	904	578	175	752	152
73-74		2067	20.1	856	52	52	856	1159	618	175	792	367
74-75		1270	20.1	861	0	-52	805	516	545	175	720	-203
75-76		1324	20.0	856	0	0	854	470	582	175	757	-287
76-77		1436	19.9	855	0	0	808	628	561	175	736	-108
77-78		1516	20.0	858	0	0	786	730	563	175	738	-8
78-79		1577	20.0	853	0	0	831	746	564	175	738	7
79-80		1839	20.0	858	0	0	741	1098	597	175	772	326
80-81		1665	20.1	859	0	0	828	837	630	175	804	32
81-82		1683	19.5	841	0	0	806	877	556	175	731	146
82-83		1837	20.5	868	36	36	868	934	782	175	957	-23
83-84		1697	19.8	853	1	-35	801	931	505	175	679	252
84-85		1684	20.0	858	0	-1	791	894	688	175	862	32
85-86		1735	20.3	864	0	0	806	928	653	175	827	101
86-87		2026	20.6	875	0	0	825	1201	766	175	941	261
87-88		2380	20.9	886	68	68	886	1427	918	175	1092	334
88-89		1839	20.3	864	58	-10	864	985	686	175	861	124
89-90		2130	20.5	873	0	-58	852	1335	556	175	730	605
90-91		1948	20.4	870	0	0	870	1078	587	175	762	316
91-92		1776	20.3	864	0	0	829	947	475	175	650	297
Moy		**1756**	**20.2**	**862**	**11**	**0**	**825**	**931**	**621**	**175**	**796**	**135**
Max		**2380**	**20.9**	**886**	**68**	**68**	**886**	**1427**	**918**	**175**	**1092**	**605**
Min		**1270**	**19.5**	**841**	**0**	**-58**	**741**	**470**	**475**	**175**	**650**	**-287**

Tableau 5.8 : Bilans hydrologiques annuels de la Nyamagana

Les années 74-75, 75-76 et 76-77 enregistrent une hauteur d'eau utile inférieure à 650 mm et leur excédent d'écoulement dépasse 100 mm. Les bilans des années 77-78 et 78-79, avec des hauteurs d'eau de 730 et 746 mm respectivement, présentent de légers écarts de fermeture (-8 et 7 mm). Pendant ces cinq années de faible pluviosité (Eu < 750 mm), les nappes de la plaine ne sont pas alimentées par le bassin supérieur.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	1689	2067	1270	1324	1436	1516	1577	1839	1665	1683	1837	1697	1684	1735	2026	2380	1839	2130	1948	1776
ETP (mm)	863	856	861	856	855	858	853	858	859	841	868	853	858	864	875	886	864	873	870	864
S (mm)	0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	36	1	0	0	0	68	58	0	0	0
ETR (mm)	785	856	805	854	808	786	831	741	828	806	868	801	791	806	825	886	864	852	870	829
Eu (mm)	904	1159	516	470	628	730	746	1098	837	877	934	931	894	928	1201	1427	985	1335	1078	947
Q + Q ir (mm)	752	792	720	757	736	738	738	772	804	731	957	679	862	827	941	1092	861	730	762	650
Ecart (mm)	152	367	-203	-287	-107	-8	7	326	32	146	-23	252	32	101	261	334	124	605	316	297

Fig. V.12 : Variation annuelle des paramètres du bilan.

Toutes les autres années enregistrent une hauteur d'eau utile supérieure à 800 mm et présentent un déficit d'écoulement qui varie entre 32 mm (84-85) et 605 mm (89-90). L'année 89-90 a enregistré un déficit d'écoulement élevé, dû probablement à une lame écoulée sous-estimée (730 mm), alors que l'eau utile pendant la même année atteint 1335 mm.

Les paramètres du bilan moyen annuel (1972-1992) sont :

P = 1756 mm

ETR = 825 mm

Eu = 931 mm

Q = 621 mm

$Q_{irrigation}$ = 175 mm

ΔS = 0 mm

L'équation du bilan moyen annuel sur une période de 20 ans s'écrit :

P- ETR – Q -$Q_{irrigation}$ - ΔS = ε = 1756 – 825 – 621 – 175 – 0 = 135 mm

L'écart de fermeture du bilan moyen annuel est de 135 mm /an, soit 7.7 % des précipitations et 14.5 % de l'eau utile.

V.6.2.2. *Estimation des réserves*

Les réserves du bassin supérieur de la Nyamagana sont estimées pour les années 83-84, 84-85, 85-86 et 86-87. Les courbes de tarissement de ces quatre années (annexe VI.2) permettent de déterminer trois coefficients qui correspondent à trois niveaux aquifères (tableau 5.9):

- le coefficient α_1, compris entre 0.01046 et 0.01407 j^{-1}, correspond au vidange des horizons superficiels ;

- le coefficient α_2 compris entre 0.00785 et 0.00952 j^{-1}, représente les horizons intermédiaires très fissurés et altérés ;

- le coefficient α_3 compris entre 0.00460 et 0.00618 j^{-1} correspond au vidange lent des aquifères profonds, ceux-ci assurant l'alimentation de la rivière en l'absence de précipitations.

	83-84	84-85	85-86	86-87
β	0.01407	0.01046	0.01081	0.01182
α_1	0.00785	0.00952	-	0.00875
α_2	0.00566	0.00460	0.00546	0 .00618

Tableau 5.9 : Coefficients de tarissement la Nyamagana

Les réserves de la Nyamagana et leur variation annuelle, calculées entre 83-84 et 86-87 sont reprises au tableau 5.10.

Les bilans hydrogéologiques annuels s'écrivent :

P - ETR – Q -$Q_{irrigation}$ - ΔS - ΔR = ε

84-85: 1684 - 791 - 688 -175 +1 - 28 = 3 mm

85-86 : 1735 - 806 - 653 - 175 - 0 + 28 = 129 mm

86-87 : 2026 - 825 - 766 - 175 - 0 - 57 = 203 mm

Le bilan moyen annuel de ces trois années s'écrit :

P- ETR – Q -$Q_{irrigation}$ - ΔS - ΔR = ε = 1815 – 807 – 702 – 175 – 0 - 19 = 112 mm

L'écart de fermeture du bilan (112 mm) représente 6% des précipitations et 11% de l'eau utile. Le bilan hydrologique annuel moyen obtenu entre 1972 et 1992 sans tenir compte de variation annuelle des réserves s'écrit :

P- ETR – Q -$Q_{irrigation}$ - ΔS = ε = 1756 – 825 – 621 – 175 – 0 = 135 mm.

Année	P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	$Q_{irrig.}$	Vol.rés	R	ΔR	ε
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm
		initiales									finales		
83-84	1697		853	1	1	801	931	505	175	4.7E+07	217		
84-85	1684	217	858	0	-1	791	894	688	175	5.3E+07	245	28	3
85-86	1735	245	864	0	0	806	928	653	175	4.7E+07	217	-28	129
86-87	2026	217	875	0	0	825	1201	766	175	5.9E+07	274	57	203
Moy	**1815**	**226**	**865**	**0**	**0**	**807**	**1008**	**702**	**175**	**5.3E+07**	**245**	**19**	**112**
X/P			**48%**	**0%**	**0%**	**44%**	**56%**	**39%**	**10%**		**14%**	**1%**	**6%**

Tableau 5.10 : Bilans hydrogéologiques de la Nyamagana.

Le volume des réserves du bassin supérieur est compris entre 4.7 x 10^7 m³ (85 - 86) et 5.9 x 10^7 m³ (86-87) soit une hauteur d'eau comprise entre 214 et 274 mm, la moyenne annuelle est égale à 5.17 x 10^7 m³ soit 238 mm. La variation de réserves d'une année à l'autre reste faible, la variation maximale (57 mm) est calculée en 86-87. La variation moyenne des réserves est égale à 19 mm, elle ne représente que 1% de la pluviométrie.

Dans le bassin de la Nyamagana, on retient que :

- si l'eau utile ne dépasse pas 700 mm, les bilans sont excédentaires (Q > Eu), la rivière sollicite les réserves accumulées dans les nappes du bassin supérieur ;

- pendant les années pluvieuses (Eu > 1000 mm) : 73-74, 79-80, 86-87, 87-88, 89-90 et 90-91, les débits n'augmentent pas de façon nette, le déficit d'écoulement alimente les réserves du bassin supérieur, les nappes de la plaine de la moyenne Rusizi et le petit lac Dogodogo ;

- les réserves du bassin supérieur sont comprises entre 4.70 x 10^7 m³ et 5.94 x 10^7 m³, soit une hauteur comprise entre 217 et 274 mm ;

- par rapport aux autres termes du bilan, la variation de réserves d'une année hydrologique à l'autre reste faible.

V.6.3. Bassin de la Muhira

La rivière Muhira, prend source à 2300 m d'altitude et se jette dans la Rusizi à 802 m, l'échelle limnimétrique est situé à 2.8 km de la confluence avec la Rusizi, à 100 m en aval de la route asphaltée. Le débit passant par le canal d'irrigation, rapporté à la superficie du bassin à l'échelle, équivaut à une lame d'eau de 81 mm par an. La fig.V.13 reprend les paramètres physiographiques et la géologie du bassin .

Dans le bassin supérieur, la rivière Muhira draine les formations géologiques suivantes:

- les pélites , phyllites et micaschistes de Ngozi et Murwi qui occupent 77.5 km² soit 34% du bassin supérieur ;

- les quartzites et conglomérats de Mabayi et Sagahanga qui s'étendent sur 81 km² (36%) ;

- le complexe de Buganda qui recouvrent les contreforts de la plaine: ce sont des gneiss migmatitiques, micaschistes et lentilles dolomitiques. Les complexes de Buganda et Ruhanga s'étendent sur 58.3 km² (26%) ;

- les roches basiques de Butahana occupent 8,2 km² (4%) ;

Les dépôts fluvio-lacustres de la Rusizi s'étendent sur 14 km².

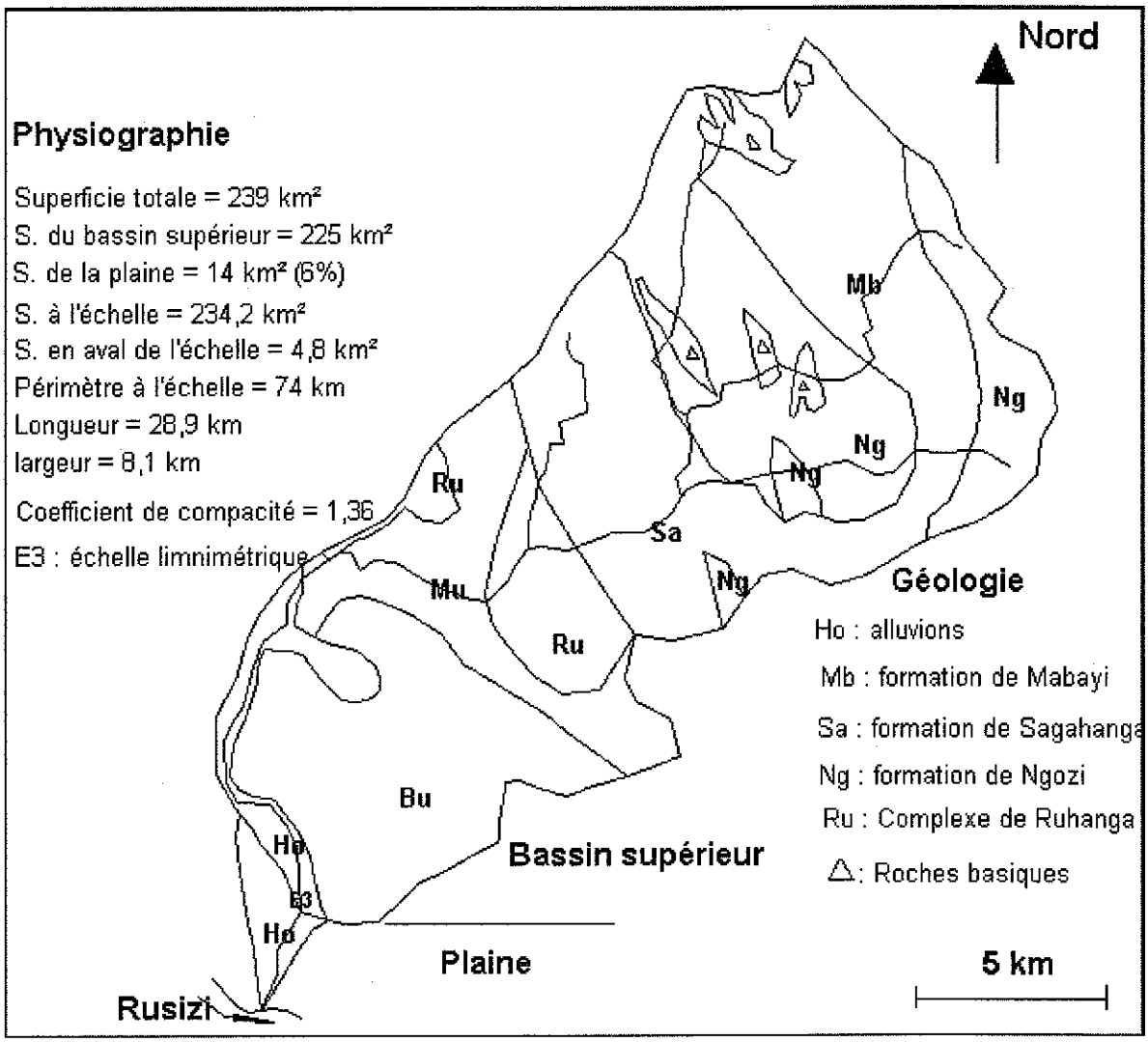


Fig.V.13 : Physiographie et géologie de la Muhira.

V.6.3.1. *Bilans annuels*

Les paramètres des bilans hydrologiques annuels sont repris au tableau 5.11. Leur variation annuelle est reprise à la fig.V.14 :

- l'eau utile varie de 497 mm (75-76) à 1159 mm (87-88) ;
- la lame écoulée ($Q + Q_{irrigation}$) : de 574 mm (89-90) à 866 mm (82-83) ;
- l'écart de fermeture : de -248 mm (75-76) à 383 mm (86-87).

Année		P	T	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Q irig	Q + Qir	Eu-Q
		(mm)	(°c)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
72-73		1682	20.2	862	0	0	769	913	684	81	765	148
73-74		1959	20.0	853	45	45	853	1061	709	81	790	271
74-75		1310	20.0	858	0	-45	793	562	663	81	744	-182
75-76		1346	20.0	853	1	1	848	497	664	81	745	-247
76-77		1564	20.0	853	0	-1	832	734	674	81	754	-22
77-78		1533	20.0	857	0	0	778	755	675	81	756	-1
78-79		1662	20.0	854	0	0	804	858	663	81	744	114
79-80		1706	20.1	856	0	0	768	938	683	81	764	174
80-81		1670	20.1	858	0	0	839	831	768	81	849	-18
81-82		1571	19.6	843	0	0	791	780	725	81	806	-26
82-83		1642	20.5	872	0	0	859	783	785	81	866	-83
83-84		1556	19.9	856	0	0	778	779	696	81	777	1
84-85		1583	20.0	858	0	0	765	818	625	81	706	112
85-86		1663	20.3	865	0	0	801	862	569	81	650	212
86-87		1890	20.6	876	0	0	833	1057	593	81	674	383
87-88		2071	20.9	882	41	41	871	1159	698	81	779	380
88-89		1764	20.3	866	29	-12	866	910	725	81	806	104
89-90		1693	20.5	873	0	-29	824	898	493	81	574	325
Moy		**1659**	**20.2**	**861**	**6**	**0**	**815**	**844**	**672**	**81**	**753**	**91**
Max		**2071**	**20.9**	**882**	**45**	**45**	**871**	**1159**	**785**	**81**	**866**	**383**
Min		**1310**	**19.6**	**843**	**0**	**-45**	**765**	**497**	**493**	**81**	**574**	**-248**

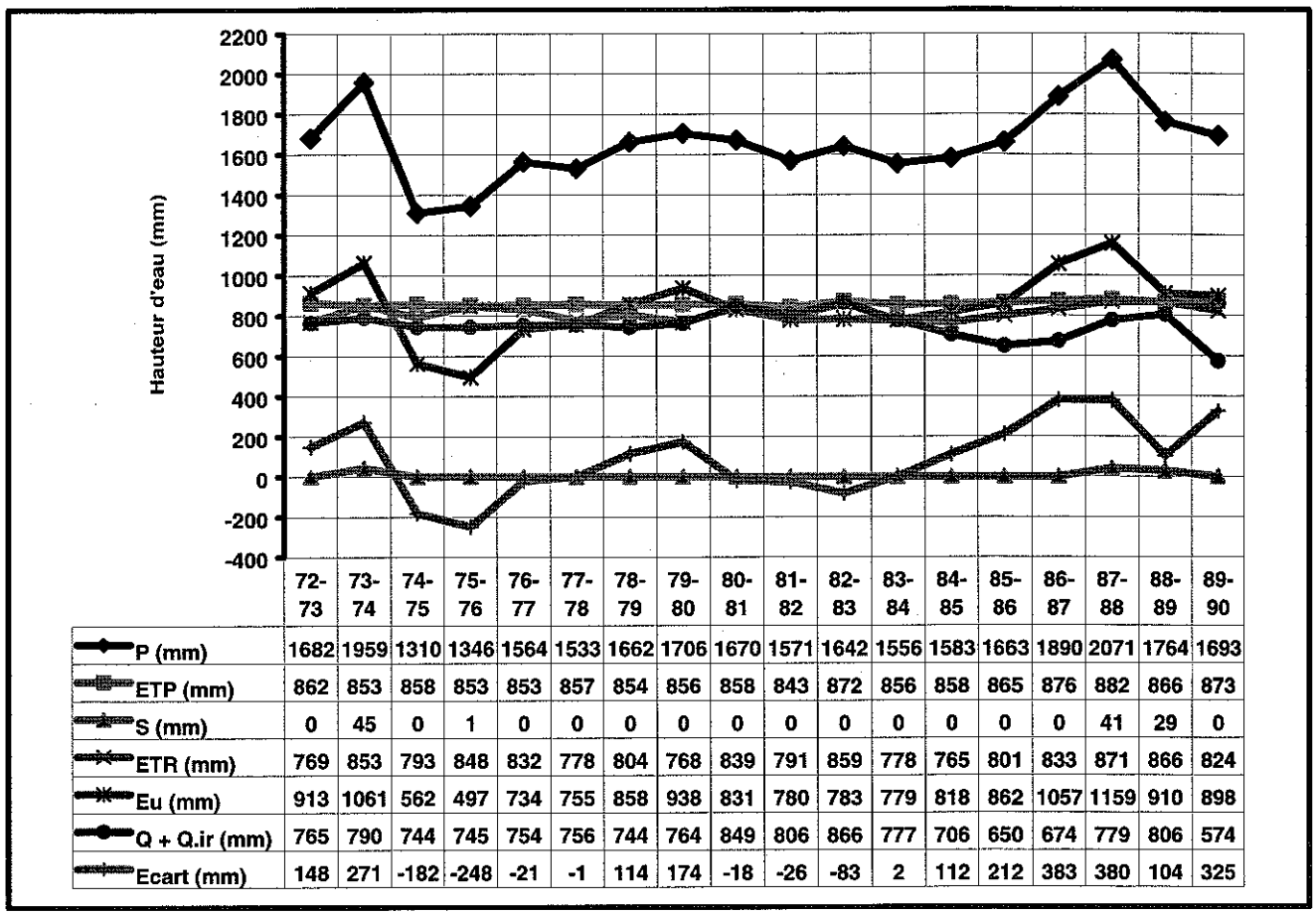
Tableau 5.11 : Bilans hydrologues annuels de la Muhira.

Les années les moins pluvieuses (P < 1400 mm),74-75 et 75-76 enregistrent une hauteur d'eau utile inférieure à 600 mm, ces années présentent un excédent d'écoulement très élevé :

74-75: P - ETR - Q - ΔS = 1310 - 793 - 744 + 45 = - 182 mm
75-76: P - ETR - Q - ΔS = 1346 - 848 - 745 - 0 = - 247 mm

Les bilans des années dont la hauteur d'eau utile est comprise entre 700 et 800 ferment avec un léger écart :

76-77: P - ETR - Q - ΔS = 1564 - 832 - 754 - 0 = - 22 mm
77-78: P - ETR - Q - ΔS = 1533 - 778 - 756 - 0 = - 1 mm
80-81: P - ETR - Q - ΔS = 1670 - 839 - 849 - 0 = - 18 mm
81-82: P - ETR - Q - ΔS = 1571 - 791 - 806 - 0 = - 26 mm
83-84: P - ETR - Q - ΔS = 1556 - 778 - 777 - 0 = 1 mm



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90
P (mm)	1682	1959	1310	1346	1564	1533	1662	1706	1670	1571	1642	1556	1583	1663	1890	2071	1764	1693
ETP (mm)	862	853	858	853	853	857	854	856	858	843	872	856	858	865	876	882	866	873
S (mm)	0	45	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	29	0
ETR (mm)	769	853	793	848	832	778	804	768	839	791	859	778	765	801	833	871	866	824
Eu (mm)	913	1061	562	497	734	755	858	938	831	780	783	779	818	862	1057	1159	910	898
Q + Q.ir (mm)	765	790	744	745	754	756	744	764	849	806	866	777	706	650	674	779	806	574
Ecart (mm)	148	271	-182	-248	-21	-1	114	174	-18	-26	-83	2	112	212	383	380	104	325

Fig.V.14 : Variation annuelle des paramètres du bilan.

A l'exception de l'année 82-83, toutes les années dont la hauteur d'eau utile est supérieure à 800 mm présentent des bilans déficitaires (Q < Eu), avec un déficit d'écoulement qui atteint 380 mm en 86-87 et 87-88, ces deux dernières années présentent une hauteur d'eau utile qui dépasse 1000 mm. Malgré l'augmentation de l'eau utile, les lames écoulées n'augmentent pas de façon nette.

L'équation du bilan moyen annuel (1972 - 1990) s'écrit :

$$P - ETR - Q - Q_{irrigation} - \Delta S = \varepsilon = 1659 - 816 - 672 - 81 - 0 = 90 \text{ mm}$$

L'écart de fermeture représente 90 mm soit 5 % des précipitations et 11% de l'eau utile .

V.6.3.2. *Estimation des réserves*

Les réserves sont estimées à partir des courbes de tarissement établies entre 81-82 et 86-87 (annexe VI.3). Les coefficients de tarissement déterminés pendant cette période sont fournis au tableau 5.12 :

- le coefficient α_1 compris 0.0093 et 0.0108 j^{-1}, représente les niveaux supérieurs altérés et fissurés ;

- le coefficient α_2, compris entre 0.0053 et 0.0064 j^{-1}, représente les niveaux profonds moins fissurés, qui assurent le débit de base pendant la période de tarissement.

	81- 82	82 - 83	83 - 84	84-85	85-86	86-87
α_1	0.00925	0.00827	-	0.02663	0.01789	0.02621
α_2	0.00609	0.00629	0.00535-0.00532	0.00667	0.00756	0.00756

Tableau 5.12 : Valeurs des coefficients de Muhira.

Le tableau 5.13 donne les paramètres du bilan entre 81-82 et 86-87. Les bilans annuels s'écrivent :

82-83: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1642 - 859 - 785 - 81 - 0 + 7 = - 76 mm
83-84: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1556 - 778 - 696 - 81 - 0 + 11 = 12 mm
84-85: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1583 - 765 - 625 - 81 - 0 + 113= 225 mm
85-86: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1663 - 801 - 569 - 81 - 0 - 31 = 181 mm
86-87: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1890 - 833 - 593 - 81 - 0 - 6 = 377 mm

On peut constater que malgré une augmentation de l'eau utile en 84-85, 85-86 et 86-87, la lame écoulée et les réserves diminuent, cela est probablement dû à la sous estimation de la quantité d'eau qui passe par le canal d'irrigation.

La variation moyenne des réserves est égale à – 19 mm soit 1% des précipitations, l'équation du bilan moyen annuel (81-87) s'écrit :

$P - ETR - Q - Q_{irrigation} - \Delta S - \Delta R = \mathcal{E} = 1667 - 807 - 654 - 81 - 0 + 19 = 144$ mm.

Année	P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	$Q_{irrig.}$	Vol.Rés	R	ΔR	ε
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m³	fin	mm	mm
		initiales								finales			
81-82	1571		843	0	0	791	780	725	81	5.3E+07	228		
82-83	1642	228	872	0	0	859	783	785	81	5.2E+07	221	-7	-76
83-84	1556	221	856	0	0	778	779	696	81	4.9E+07	210	-11	12
84-85	1583	210	858	0	0	765	818	625	81	2.3E+07	98	-113	225
85-86	1663	98	865	0	0	801	862	569	81	3.0E+07	128	31	181
86-87	1890	128	876	0	0	833	1057	593	81	3.2E+07	135	6	377
Moy	**1667**	**177**	**865**	**0**	**0**	**807**	**860**	**654**	**81**	**3,7E+07**	**158**	**-19**	**144**
			52%	**0%**	**0%**	**48%**	**52%**	**39%**	**5%**		**10%**	**-1%**	**9%**

Tableau 5.13 : Paramètres du bilan hydrogéologique .

Les réserves du bassin supérieur, calculées entre 81-82 et 86-87 sont comprises entre 2.3 x 10^7 m³ et 5.3 x 10^7 m³ , soit une hauteur d'eau comprise entre 98 et 228 mm. La moyenne annuelle est égale à 3.7 x 10^7 m³ soit une hauteur d'eau de 158 mm.

L'écart de fermeture représente 9% des précipitations et 17% de l'eau utile.

Dans le bassin de la Muhira, on retient que :

- si la hauteur d'eau utile est inférieure à 800 mm, la hauteur d'eau utile est inférieure à la lame écoulée et l'excédent d'écoulement provient d'une partie des réserves du bassin supérieur ;

- l'augmentation de l'eau utile n'induit pas d'augmentation proportionnelle des débits à l'exutoire, puisque la variation des réserves dans le bassin supérieure reste faible, la plus grande partie du déficit passe dans les nappes de la plaine ;

- l'existence de deux horizons aquifères qui assurent le débit de la rivière en période de tarissement ;

- le volume des réserves du bassin supérieur est compris entre 2.3 x 10^7 m³ et 5.2 x 10^7 m³, soit une hauteur d'eau comprise entre 98 et 221 mm ;

- le déficit moyen d'écoulement durant la période 1972-1990 est estimé à 91 mm, soit 5% des précipitations et 11% de l'eau utile.

V.6.4. Bassin de la Kaburantwa

Le bassin de la Kaburantwa est le plus étendu des bassins étudiés. Au Nord, il contourne les bassins de la Muhira et Nyamagana et déborde sur le territoire du Rwanda. La rivière, longue de 67,3 km, prend source à 2652 m d'altitude, elle fait frontière avec le Rwanda sur une partie de son cours amont où elle longe la crête Congo Nil, dans une direction générale NW-SE. A mi-parcours, elle amorce pratiquement un angle de 90° et prend une direction NE-SW et rejoint la Rusizi à 795 m d'altitude. L'échelle limnimétrique est située en amont de la RN5, à 3 km de la confluence avec la Rusizi.

La fig.V.15 reprend les paramètres physiographiques et la géologie de la Kaburantwa .

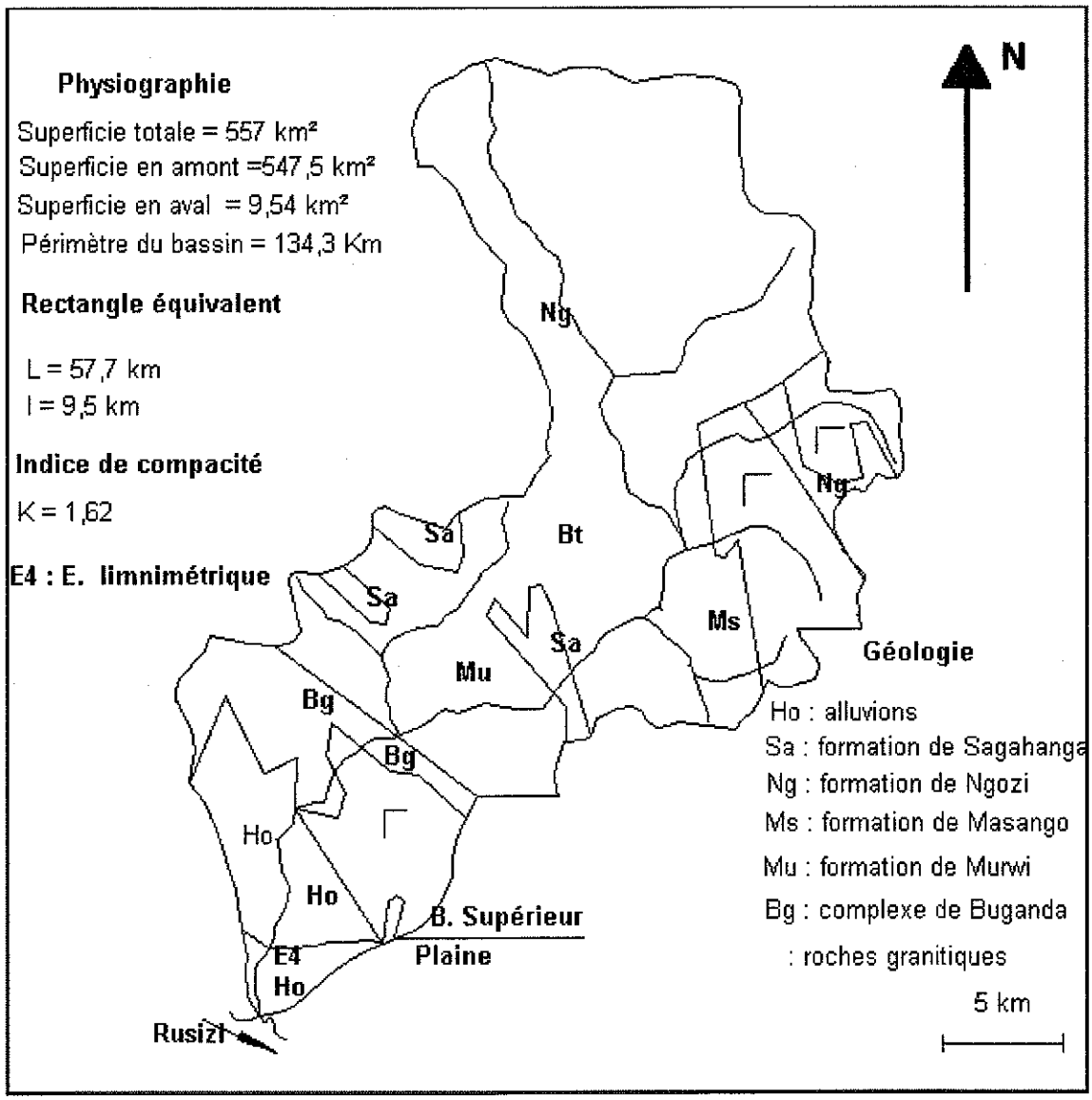


Fig.V.15 : Physiographie et géologie de Kaburantwa

Le bassin supérieur est constitué par :

- les formations de Ngozi, Murwi, Masango et Butara, ce sont des pélites, phyllites et micaschistes et recouvrent la crête Congo-Nil, elles représentent près de 73% de la superficie du bassin supérieur ;

- les quartzites et conglomérats de Sagahanga (3%), le complexe de Buganda (7%), les roches granitiques et les granitoïdes de Kaburantwa (13%) recouvrent les contreforts de la plaine.

Les dépôts de la plaine occupent près de 10 km² soit moins de 2% de la superficie totale du bassin.

V.6.4.1. *Bilans annuels*

Le tableau 5.14 fournit les paramètres des bilans de la Kaburantwa et leur variation annuelle entre 1973 et 1992 est reprise à la fig.V.16 :

- l'eau utile varie de 756 mm (75-76) à 1326 mm (87-88) ;

- la lame écoulée de 451 mm (83-84) à 1070 mm (87-88).

Durant toute la période, les bilans hydrologiques annuels sont déficitaires, les déficits d'écoulement varient de 7 mm (91-92) à 544 mm (73-74).

Pendant les années moins pluvieuses (P < 1650 mm), 74-75,75-76 et 91-92 , l'eau utile est inférieure à 900 mm et les écarts de fermeture sont moins élevés, les bilans de ces trois années s'écrivent :

74-75 : P - ETR - Q - ΔS = 1488 - 762 - 721 + 48 = 53 mm
75-76 : P - ETR - Q - ΔS = 1582 - 802 - 721 - 25 = 34 mm
91-92 : P - ETR - Q - ΔS = 1635 - 783 - 846 - 0 = 6 mm.

Toutes les autres années enregistrent une hauteur d'eau utile supérieure à 900 mm et présentent un déficit d'écoulement élevé. Les années 73-74, 78-79 et 83-84 ont un déficit (544, 489 et 506 mm) qui dépasse 40% de l'eau utile, il est dû probablement aux faibles débits enregistrés (sous-estimés ?).

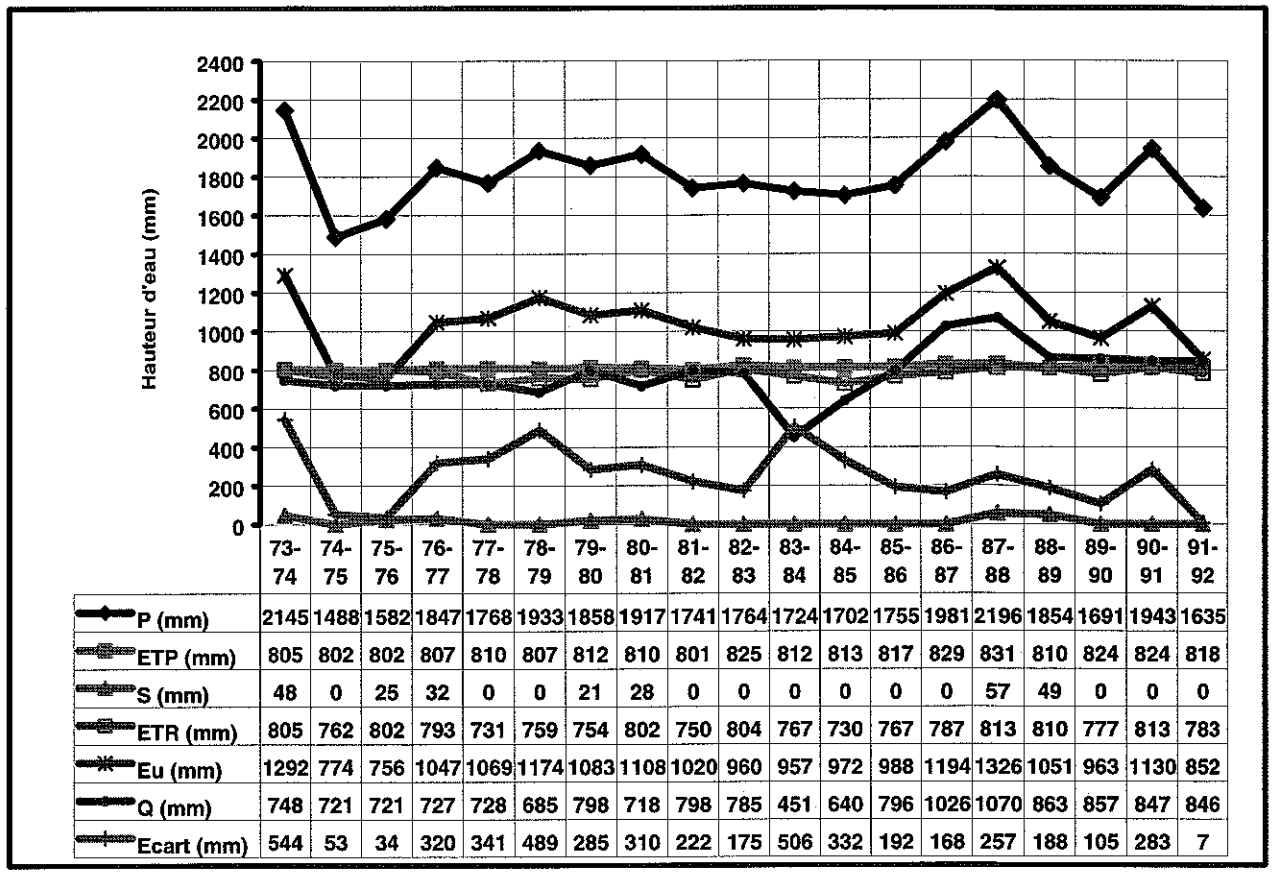
Année		P	T	ETP	S	Var S	ETR	Eu	Q	Eu-Q
		mm	(°c)	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
73-74		2145	18.3	805	48	48	805	1292	748	544
74-75		1488	18.2	802	0	-48	762	774	721	53
75-76		1582	18.2	802	25	25	802	756	721	34
76-77		1847	18.4	807	32	7	793	1047	727	320
77-78		1768	18.5	810	0	-32	731	1069	728	341
78-79		1933	18.4	807	0	0	759	1174	685	489
79-80		1858	18.6	812	21	21	754	1083	798	285
80-81		1917	18.5	810	28	7	802	1108	718	390
81-82		1741	18.1	801	0	-28	750	1020	798	222
82-83		1764	18.9	825	0	0	804	960	785	175
83-84		1724	18.4	812	0	0	767	957	451	506
84-85		1702	18.4	813	0	0	730	972	640	332
85-86		1755	18.6	817	0	0	767	988	796	192
86-87		1981	19.1	829	0	0	787	1194	1026	168
87-88		2196	19.2	831	57	57	813	1326	1070	257
88-89		1854	18.5	810	49	-8	810	1051	863	188
89-90		1691	18.9	824	0	-49	777	963	857	105
90-91		1943	18.9	824	0	0	813	1130	847	283
91-92		1635	18.7	818	0	0	783	852	846	6
Moy		**1817**	**18.6**	**814**	**14**	**0**	**779**	**1038**	**780**	**257**
Max		**2196**	**19.2**	**831**	**57**	**57**	**813**	**1326**	**1070**	**544**
Min		**1488**	**18.1**	**801**	**0**	**-49**	**730**	**756**	**451**	**7**

Tableau 5.14 : Bilans hydrologiques annuels de la Kaburantwa.

L'équation du bilan moyen annuel (1973 –1992) s'écrit :

$$P - ETR - Q - \Delta S = 1817 - 779 - 780 - 0 = 258 \text{ mm}$$

L'écart moyen de fermeture (ε) représente 14% des précipitations et 24 % de l'eau utile. Si l'on ignore les trois années dont les débits nous paraissent sous-estimés, l'écart moyen de fermeture est égal à 206 mm soit 12% de P et 20% de l'Eu.



	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	2145	1488	1582	1847	1768	1933	1858	1917	1741	1764	1724	1702	1755	1981	2196	1854	1691	1943	1635
ETP (mm)	805	802	802	807	810	807	812	810	801	825	812	813	817	829	831	810	824	824	818
S (mm)	48	0	25	32	0	0	21	28	0	0	0	0	0	0	57	49	0	0	0
ETR (mm)	805	762	802	793	731	759	754	802	750	804	767	730	767	787	813	810	777	813	783
Eu (mm)	1292	774	756	1047	1069	1174	1083	1108	1020	960	957	972	988	1194	1326	1051	963	1130	852
Q (mm)	748	721	721	727	728	685	798	718	798	785	451	640	796	1026	1070	863	857	847	846
Ecart (mm)	544	53	34	320	341	489	285	310	222	175	506	332	192	168	257	188	105	283	7

Fig.V.16 : Variation annuelle des paramètres du bilan.

V.6.4.2. *Estimation de réserves*

Les courbes de tarissement établies entre 1985 et 1990 (annexe VI.4) permettent de calculer les coefficients α suivants (tableau 5.15) :

- le coefficient α_1, compris entre 0.00710 et 0.01340 j^{-1},représente les horizons aquifères superficiels ;

- le coefficient α_2, compris entre 0.00452 et 0.00550 j^{-1}, représente les niveaux profonds fissurés qui assurent la fonction capacitive du bassin.

	85 - 86	86-87	87 - 88	88 - 89	89 - 90
α_1	0.01003	0.00893		0.01340	0.00710
α_2	0.00516	0.00550	0,00460	0.00444	0.00452

Tableau 5.15 : Coefficients de tarissement de la Kaburantwa.

Les bilans hydrogéologiques entre 85-86 et 89-90 sont repris au tableau 5.16 :

Les bilans annuels de cette période s'écrivent :

86-87: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1981 - 787 - 1026 - 0 -174 = - 6 mm
87-88: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 2196 - 813 - 1070 - 57 + 46= 302 mm
88-89: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1854 - 810 - 863 + 8 + 100 = 289 mm
89-90: P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1691 - 777 - 857 + 49 - 37 = 69 mm

Le bilan moyen annuel s'écrit :

$$P - ETR - Q - \Delta S - \Delta R = \mathcal{E} = 1930 - 797 - 954 - 0 - 16 = 163 \text{ mm}$$

L'écart de fermeture, qui est égal à 163 mm, représente 8% des précipitations et 14% de l'eau utile.

Année	P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Vol.Rés	R	ΔR	$\mathcal{E}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m³	mm	mm	mm
		initiales								finales		
85-86	1755		817	0	0	767	988	796	1.7E+08	315		
86-87	1981	315	829	0	0	787	1194	1026	2.7E+08	489	174	-6
87-88	2196	489	831	57	57	813	1326	1070	2.4E+08	442	-46	303
88-89	1854	442	810	49	-8	810	1051	863	1.9E+08	342	-100	289
89-90	1691	342	824	0	-49	777	963	857	2.1E+08	379	37	69
Moy	**1930**	**397**	**824**	**26**	**0**	**797**	**1133**	**954**	2.3E+08	**413**	**16**	**163**
			43%	**1%**	**0%**	**41%**	**59%**	**49%**		**21%**	**1%**	**8%**

Tableau 5.16 : Bilans hydrogéologiques de la Kaburantwa.

Le volume des réserves du bassin supérieur est compris entre 1.7 x 10^8 m³ (85-86) et 2.7 x 10^8 m³ (86-87) soit une hauteur d'eau comprise entre 315 et 489 mm. On observe que le bassin supérieur de la Kaburantwa renferme les réserves les plus élevées des bassins étudiés.

A la fin de la période de tarissement, la moyenne annuelle est estimée à 2.3 x 10^8 m³ soit une hauteur d'eau de 413 mm. La variation maximale des réserves (174 mm) est calculée en 86-87, la variation moyenne est égale à 16 mm soit 1% des précipitations.

V.6.5. Bassin de la Kagunuzi

Le bassin de la Kagunuzi a le point culminant à 2665 m d'altitude et se jette dans la Rusizi à une altitude de 794 m. L'échelle limnimétrique se trouve à 1.7 km de la Rusizi, en aval du pont de la route RN5. La fig.V.17 reprend les paramètres physiographiques et la géologie du bassin.

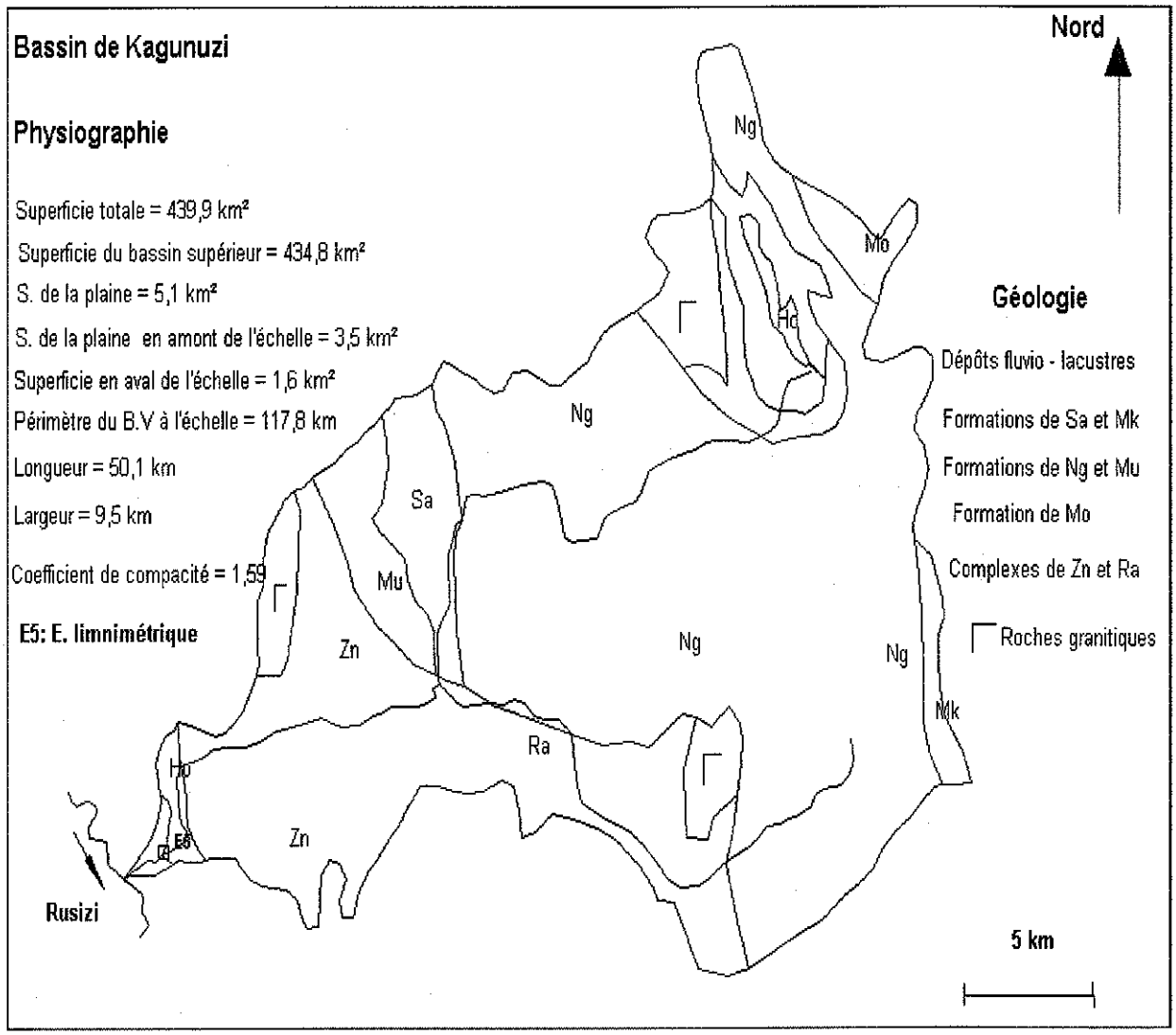


Fig.V.17 : Physiographie et géologie de Kagunuzi.

Le bassin est recouvert par les formations géologiques suivantes :

- les formations de Ngozi (Ng) et Muyebe (My) constituées de pélites, phyllites et micaschistes, elles couvrent la crête Congo-Nil et représentent 60% du bassin supérieur ;

- le complexe de Zina-Randa (Zn - Ra) formé de paragneiss, amphibolites très foliés, micaschistes et schistes mylonitiques avec des lentilles de

calcaire dolomitique métamorphique. Il est localisé dans les contreforts de la plaine et occupe près de 25% du bassin ;

- d'autres formations d'extension limitée sont observées dans le bassin, ce sont : les granitoïdes de Kaburantwa (10%), localisés dans les contreforts, les conglomérats de Mikiko et les quartzites de Mwokora qui occupent les sommets de la crête ;

- les dépôts fluvio-lacustres de la plaine n'occupent que 5,1 km² sur une superficie totale de 439.9 km².

V.6.5.1. *Bilans annuels*

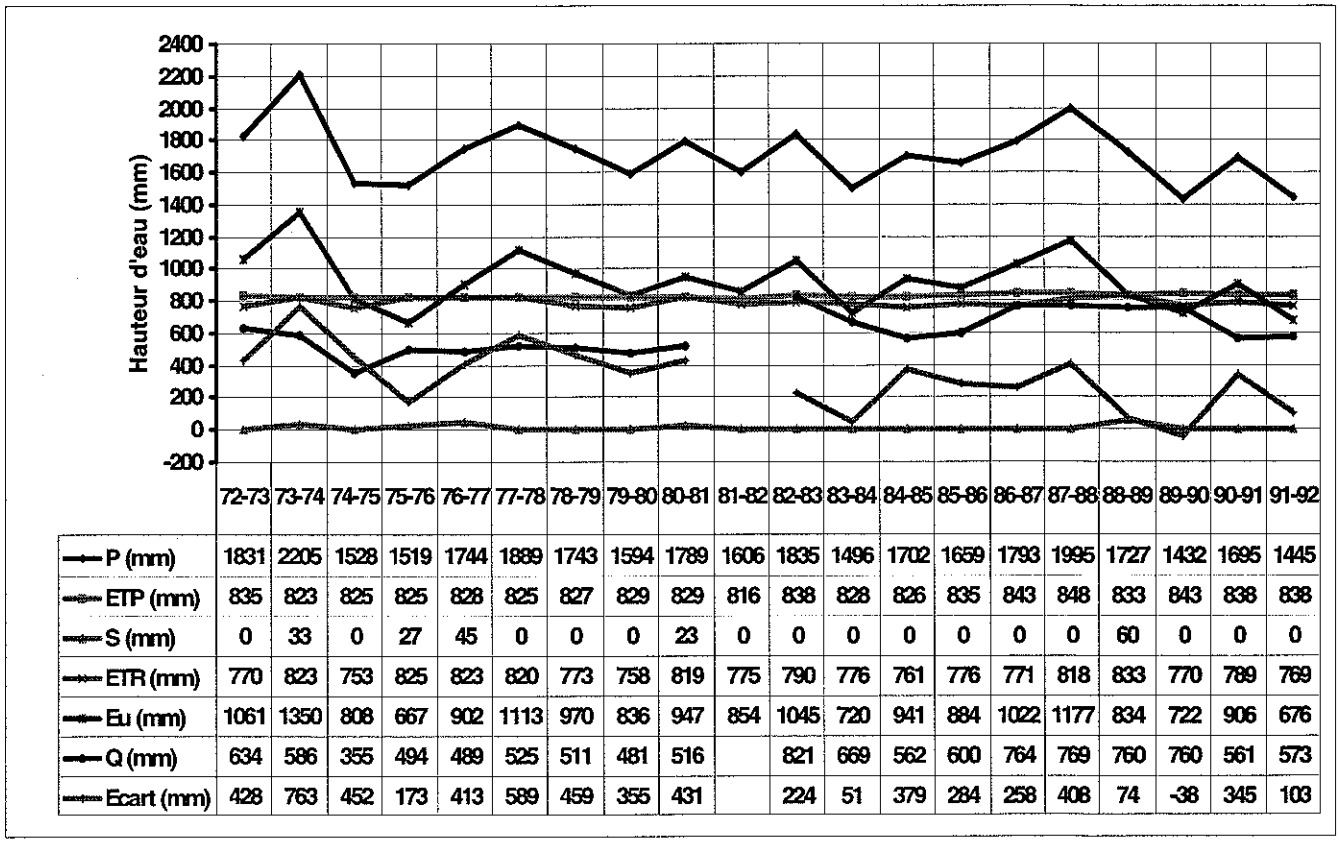
Le tableau 5.17 fournit les paramètres du bilan annuel et la fig.V.18 montre leur variation pendant cette période :

Année		P	T	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Eu-Q
		mm	(°c)	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
72-73		1831	19.2	835	0	0	770	1061	634	428
73-74		2205	18.9	823	33	33	823	1350	586	763
74-75		1528	18.9	825	0	-33	753	808	355	452
75-76		1519	18.9	825	27	27	825	667	494	173
76-77		1744	18.9	828	45	18	823	902	489	413
77-78		1889	19.0	825	0	-45	820	1113	525	589
78-79		1743	19.0	827	0	0	773	970	511	459
79-80		1594	19.1	829	0	0	758	836	481	355
80-81		1789	19.1	829	23	23	819	947	516	431
81-82		1606	18.6	816	0	-23	775	854		
82-83		1835	19.5	838	0	0	790	1045	821	224
83-84		1496	18.9	828	0	0	776	720	669	51
84-85		1702	19.0	826	0	0	761	941	562	379
85-86		1659	19.2	835	0	0	776	884	600	284
86-87		1793	19.6	843	0	0	771	1022	764	258
87-88		1995	19.8	848	0	0	818	1177	769	408
88-89		1727	19.1	833	60	60	833	834	760	74
89-90		1432	19.5	843	0	-60	770	722	760	-38
90-91		1695	19.5	838	0	0	789	906	561	345
91-92		1445	19.3	838	0	0	769	676	573	103
Moyenne		**1711**	**19.1**	**832**	**9**	**0**	**790**	**922**	**602**	**320**
Max		**2205**	**19.8**	**848**	**60**	**60**	**833**	**1350**	**821**	**763**
Min		**1432**	**18.6**	**816**	**0**	**-60**	**753**	**667**	**355**	**-38**

Tableau 5.17 : Bilans hydrologiques annuels de la Kagunuzi.

- la pluviométrie varie entre 1432 mm (89-90) et 2205 mm (73-74 ;
- l'ETR varie entre 753 mm (74-75) et 833 mm (88-89) ;
- la variation d'humidité ΔS est comprise entre –60 mm (89-90) et 60 mm (88-89), sa variation totale est nulle ;
- l'eau utile varie entre 667 mm (75-76) et 1350 mm (73-74) ;
- la lame écoulée varie de 355 mm (74-75) à 821 mm (82-83) ;
- l'écart de fermeture du bilan varie de – 38 mm (89-90) à 763 mm (73-74).

A la figure V.18, on peut constater que les débits reconstitués par Lahmeyer International entre 1972 et 1981 sont lissés, la lame annuelle écoulée durant cette période oscille autour de 500 mm (exceptée 74-75), avec une moyenne annuelle égale à 510 mm, soit 53% de l'eau utile.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92
P (mm)	1831	2205	1528	1519	1744	1889	1743	1594	1789	1606	1835	1496	1702	1659	1793	1995	1727	1432	1695	1445
ETP (mm)	835	823	825	825	828	825	827	829	829	816	838	828	826	835	843	848	833	843	838	838
S (mm)	0	33	0	27	45	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0
ETR (mm)	770	823	753	825	823	820	773	758	819	775	790	776	761	776	771	818	833	770	789	769
Eu (mm)	1061	1350	808	667	902	1113	970	836	947	854	1045	720	941	884	1022	1177	834	722	906	676
Q (mm)	634	586	355	494	489	525	511	481	516		821	669	562	600	764	769	760	760	561	573
Ecart (mm)	428	763	452	173	413	589	459	355	431		224	51	379	284	258	408	74	-38	345	103

Figure V.18 : Variation annuelle des paramètres du bilan

L'équation du bilan moyen de la période 72-81 s'écrit :

$$P - ETR - Q - \Delta S = 1760 - 796 - 510 - 3 = 451 \text{ mm}$$

L'écart moyen de fermeture est égal à 451 mm soit 47% de l'eau utile. Si l'on considère les débits fournis par l'IGEBU (1982 - 1992), l'équation du bilan moyen devient :

$$P - ETR - Q - \Delta S = 1678 - 785 - 684 - 0 = 209 \text{ mm}$$

Par rapport à la période 72-81, on remarque que l'écart moyen de fermeture (82-92) est égal à 209 mm, soit 23% de l'eau utile, il est réduit de plus de 50%. Les débits fournis par l'IGEBU étant des débits jaugés, ils nous paraissent plus fiables que ceux reconstitués par Lahmeyer.

La rivière Kagunuzi étant régulée par le barrage de Rwegura, il n'est pas possible d'estimer les réserves du bassin à partir de la station liminimétrique située en aval du dit barrage.

V.6.6. Bassin de la Mpanda

Le bassin de la Mpanda a une forme globale allongée en direction NE-SW, le point culminant se trouve à 2665 m et le plus bas se trouve à 775 m, à sa confluence avec la grande Rusizi. D'une superficie totale de 498 km², le bassin supérieur occupe 344 km² (69%) et la plaine s'étend sur 154 km² (31%). Deux échelles limnimétriques sont installées sur la Mpanda : à Gatura en amont de la plaine et à l'axe D situé au milieu de la plaine, à 6,9 km de sa confluence avec la grande Rusizi. La fig.V.19 reprend les paramètres physiographiques et les caractéristiques géologiques du bassin de la Mpanda.

Entre Gatura et l'axe D, la Mpanda reçoit trois affluents: la Ninga, qui prend source à la limite entre la plaine et les contreforts, la Gifurwe et Musenyi qui prennent source dans les contreforts de la plaine.

A son entrée dans la plaine, le débit moyen de la Gifurwe est estimé à 2 m³/s pendant la saison de pluie et 0.5 m³/s en période d'étiage. Cette rivière est détournée dans le canal de Gifurwe pour des raisons d'irrigation et rejoint au Sud la rivière Musenyi.

A son entrée dans la plaine, la Musenyi a un débit moyen de 1,1m³/s et un débit moyen d 'étiage estimé à 0,3 m³/s. A la confluence avec le canal, il se crée une zone d'inondations pendant la saison des pluies.

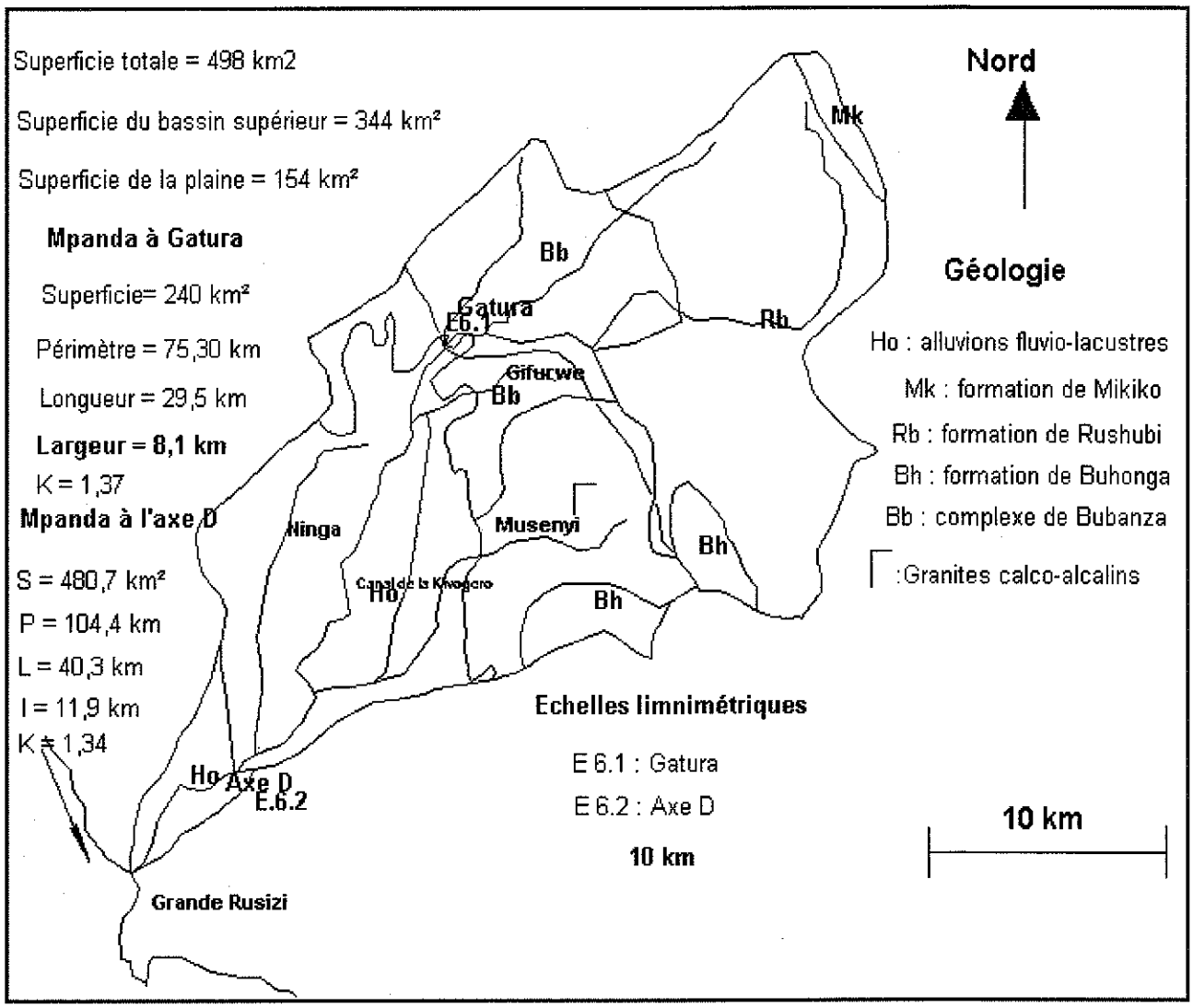


Fig. V.19: Physiographie et géologie de la Mpanda

Les eaux de ces trois affluents sont sollicitées par la population riveraine pour des besoins d'irrigation surtout pendant la saison sèche où les agriculteurs qui pratiquent des cultures de marais les dévient à leur guise, ce qui perturbe souvent le jaugeage au niveau de l'axe D.

Du point de vue géologique, en amont de Gatura, le bassin est entièrement formé de roches précambriennes où prédominent deux grandes formations :

- la formation de Rushubi-Muyebe (Rb), constituée de phyllites et micaschistes avec de minces niveaux quartzitiques ; elle occupe en grande partie la crête Congo-Nil et s'étend sur près de 155 km² ;

- le complexe de Bubanza (Bb) a une lithologie métasédimentaire essentiellement constituée par des bancs gréseux, psammitiques alternant avec des niveaux plus pélitiques. Ce complexe contient de

nombreuses injections pegmatitiques, concordantes au litage de l'encaissant. Il a une superficie de 67 km².

D'autres formations d'extension réduite sont:

- la formation de Mikiko (Mk) sur les sommets de la crête, elle comprend à la base un niveau conglomératique dont les éléments principaux sont des galets de quartzite, suivi par niveau détritique grossier, ce dernier est une alternance de psammoschistes et de quartzites mal classés ;

- la formation de Rugazi constituée de quartzites avec de minces intercalations de phyllites ou micaschistes ;

- au Sud-Est, les contreforts sont couverts par le complexe de Bubanza ,les granitoïdes de la Mugere avec de nombreux corps de gabbros foliés parallèlement aux séquences granitiques et les quartzites de Buhonga. C'est dans ces formations que prennent naissance les petites rivières Gifurwe et Musenyi ;

- entre Gatura et axe D, les dépôts fluvio-lacustres occupent 136 km².

V.6.6.1. *Bilans annuels à Gatura*

L 'échelle de Gatura est placée en amont de la plaine, à 940 m d'altitude. Les bilans hydrologiques sont déterminés entre 1972 et 1987 (les débits entre 1990 et 1992 manquent), les paramètres varient de façon suivante (fig.V.20) :

- la pluviométrie varie de 1387 mm (83-84) à 2212 mm (73-74) ;

- l'ETR varie de 705 mm (79-80) à 826 mm (77-78) ;

- l'eau utile est comprise entre 594 (75-76) et 1362 mm (73-74) ;

- la lame varie entre 518 (79-80) et 698 mm (80-81).

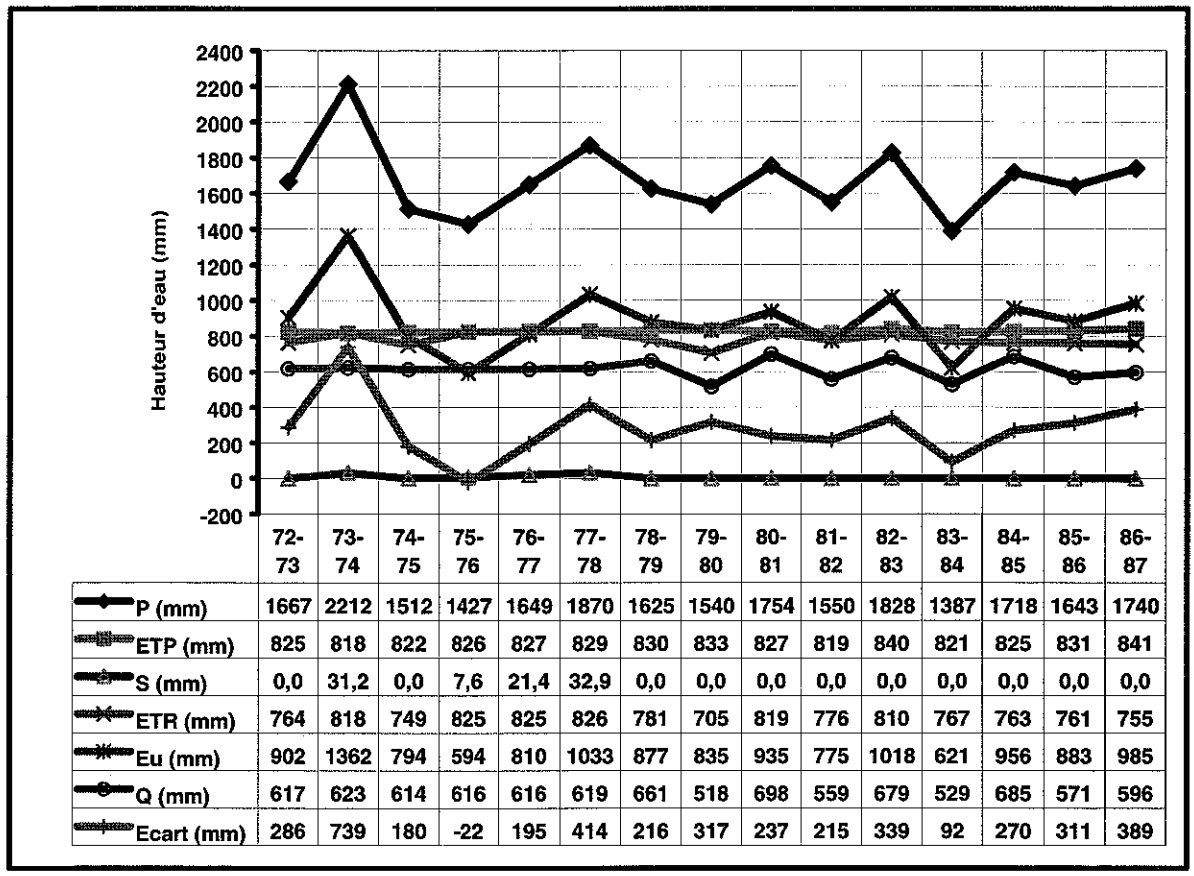
A l'exception de l'année 75-76 dont la hauteur d'eau utile est inférieure à 600 mm, toutes les autres années présentent des bilans déficitaires avec des déficits variant entre 92 mm (83-84) et 739 mm (73-74).

Année		P	T	ETP	S	ΔS	ETR	EU	Q	EU-Q
		(mm)	(°c)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
72-73		1667	19.0	825	0	0	764	902	617	286
73-74		2212	18.7	818	31	31	818	1362	623	740
74-75		1512	18.8	822	0	-31	749	794	614	180
75-76		1427	18.9	826	8	8	825	594	616	-22
76-77		1649	19.0	827	21	14	825	810	616	195
77-78		1870	19.1	829	33	12	826	1033	619	414
78-79		1625	19.0	830	0	-33	781	877	661	216
79-80		1540	19.1	833	0	0	705	835	518	317
80-81		1754	19.0	827	0	0	819	935	698	237
81-82		1550	18.7	819	0	0	776	775	559	215
82-83		1828	19.4	840	0	0	810	1018	679	339
83-84		1387	18.8	821	0	0	767	621	529	92
84-85		1718	19.0	825	0	0	763	956	685	270
85-86		1643	19.2	831	0	0	761	883	571	311
86-87		1740	19.5	841	0	0	755	985	596	389
Moy		**1675**	**19.0**	**828**	**6**	**0**	**783**	**892**	**579**	**279**
Max		**2212**	**19.5**	**841**	**33**	**31**	**826**	**1362**	**698**	**740**
Min		**1387**	**18.7**	**818**	**0**	**-33**	**705**	**594**	**449**	**-22**

Tableau V.18 : Bilans hydrologiques annuels de la Mpanda à Gatura.

Pendant les années très pluvieuses (P > 1700 mm), 73-74 (Eu = 1362 mm), 77-78 (Eu = 1033 mm), 82-83 (Eu = 1018 mm) et 86-87 (Eu = 985 mm), les bilans s'écrivent :

73-74 : P - ETR - Q - ΔS = 2212 - 818 - 623 - 31 = 740 mm
77-78 : P - ETR - Q - ΔS = 1870 - 826 - 619 - 12 = 413 mm
82-83 : P - ETR - Q - ΔS = 1828 - 810 - 679 - 0 = 339 mm
86-87 : P - ETR - Q - ΔS = 1740 - 755 - 596 - 0 = 389 mm



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87
P (mm)	1667	2212	1512	1427	1649	1870	1625	1540	1754	1550	1828	1387	1718	1643	1740
ETP (mm)	825	818	822	826	827	829	830	833	827	819	840	821	825	831	841
S (mm)	0,0	31,2	0,0	7,6	21,4	32,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ETR (mm)	764	818	749	825	825	826	781	705	819	776	810	767	763	761	755
Eu (mm)	902	1362	794	594	810	1033	877	835	935	775	1018	621	956	883	985
Q (mm)	617	623	614	616	616	619	661	518	698	559	679	529	685	571	596
Ecart (mm)	286	739	180	-22	195	414	216	317	237	215	339	92	270	311	389

Fig. V.20 : Variation annuelle des paramètres de la Mpanda à Gatura.

On observe que la lame écoulée n'augmente pas beaucoup avec l'augmentation de l'eau utile, d'où les déficits d'écoulements très importants qui peuvent dépasser 40% de l'eau utile pendant les années humides.

L'équation du bilan moyen annuel (1972-1987) s'écrit :

$$P - ETR - Q - \Delta S = \mathcal{E} = 1675 - 783 - 613 - 0 = 279 \text{ mm}$$

L'écart moyen de fermeture est de 279 mm soit 17 % des précipitations et 31% de l'eau utile.

V.6.6.2. *Estimation des réserves*

Les courbes de tarissement (annexe VI.5) , déterminées entre 1983 et1986, présentent une allure irrégulière d'une année à l'autre, deux coefficients α sont calculés (tableau 5.19) :

- le coefficient α_1 lié aux formations aquifères altérées et fissurées, est compris entre 0.00828 et 0.01106 j^{-1} ;

- le coefficient α_2 qui correspond aux formations faiblement fissurés qui assurent le débit de base, est compris entre 0,0052 et 0,0098 j^{-1}.

	82-83	83-84	84-85	85-86
α_1	0.00828	0.01106	0.00868	0.00920
α_2	0.00704	0.01093	0.00730	0.00719

Tableau 5.19 : Coefficients de tarissement de la Mpanda à Gatura.

Les bilans hydrogéologiques annuels entre 82-83 et 85-86 s'écrivent :

83-84 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1387 - 767 - 529 - 0 + 42 = 133 mm
84-85 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1718 - 763 - 685 - 0 - 34 = 236 mm
85-86 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1643 - 761 - 575 - 0 + 15 = 322 mm

La plus grande variation est calculée en 83-84 où les réserves ont diminué de 42 mm, suite à la diminution de l'eau utile qui est passée de 1018 mm en 82-83 à 621 mm en 83-84. La variation moyenne des réserves reste faible (- 7 mm).

L'équation du bilan moyen annuel de ces trois années s'écrit :

83-86 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1583 - 763 - 595 - 0 + 7 = 232 mm

L'écart de fermeture du bilan moyen est égal à 232 mm soit 15% des précipitations et 28% de l'eau utile.

Entre 82-83 et 85-86, le volume de réserves de la Mpanda à Gatura est compris entre 2.62 x 10^7 et 3.62 x 10^7 m^3, soit une hauteur d'eau comprise entre 109 et 151 mm. La moyenne annuelle est égale à 3.18 x 10^7 m^3 soit une hauteur d'eau égale à 133 mm.

Année	P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Vol.Rés	R	ΔR	ε
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm
		initiales								finales		
82-83	1828		840	0	0	810	1018	679	3.6E+07	151		
83-84	1387	151	821	0	0	767	621	529	2.6E+07	109	-42	133
84-85	1718	109	825	0	0	763	956	685	3.4E+07	143	34	236
85-86	1643	143	831	0	0	761	883	571	3.1E+07	128	-15	322
Moy	1583	134	825	0	0	763	820	595	3.0E+07	127	-7	232
X/P			52%	0%	0%	48%	52%	38%		8%	0%	15%

Tableau 5.20 : Bilans hydrogéologiques de la Mpanda à Gatura .

Entre 82-83 et 85-86, le volume des réserves de la Mpanda à Gatura est compris entre 2.6 x 10^7 et 3.6 x 10^7 m^3, soit une hauteur d'eau comprise entre 109 et 151 mm. La moyenne annuelle est égale à 3 x 10^7 m^3, soit une hauteur d'eau égale à 127 mm.

V.6.6.3. *Bilans annuels à l'axe D*

Les paramètres des bilans hydrologiques de la Mpanda à l'axe D sont repris au tableau 5.21 et leur variation annuelle à la fig.V.21 :

- la pluviométrie varie de 1133 mm (83-84) à 1685 mm (73-74) ;

- l'ETR varie de 730 mm (79-80) à 866 mm (73-74) ;

- l'eau utile varie de 347 mm (75-76) à 819 mm (73-74) ;

- la lame écoulée varie de 224 mm (78-79) à 541 mm (86-87).

Durant toute la période, les bilans sont déficitaires avec des déficits d'écoulement pouvant atteindre plus de 500 mm. Les années moins pluvieuses, 75-76 et 83-84, enregistrent une eau utile inférieure à 400 mm, leurs bilans sont :

75-76 : P = ETR - Q - ΔS = 1193 - 845 - 283 - 0 = 65 mm
83-84 : P = ETR - Q - ΔS = 1133 - 751 - 255 - 0 = 127 mm

Les écarts de fermeture de ces deux années représentent 19 et 33% de l'eau utile.

Les années pluvieuses 73-74 (Eu = 819 mm), 77-78 (Eu = 683 mm) et 82-83 (Eu = 710 mm) présentent les bilans suivants :

73-74 : P = ETR - Q - ΔS = 1685 - 866 – 291 – 0 = 528 mm

77-78 : P = ETR - Q - ΔS = 1480 - 797– 282 – 0 = 401 mm

82-83 : P = ETR - Q - ΔS = 1515 - 806– 374 – 0 = 335 mm

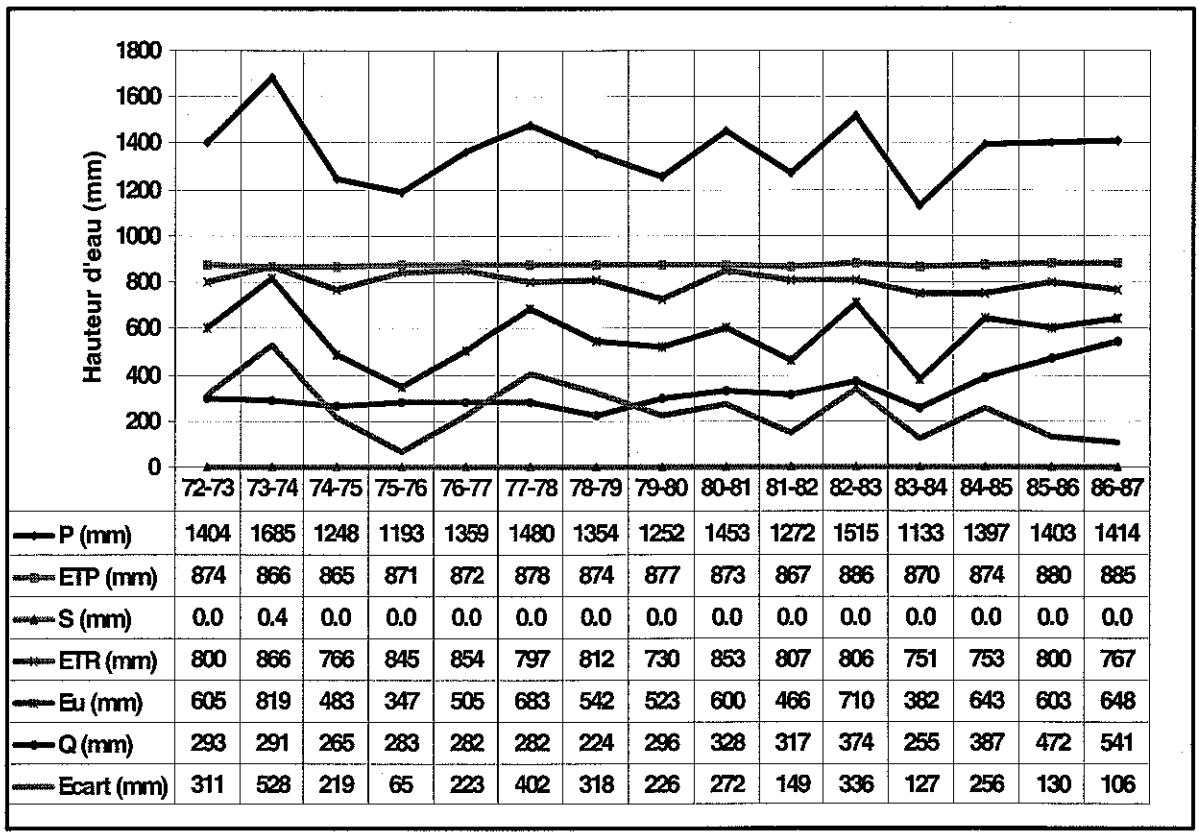
Les déficits d'écoulement de ces trois années atteignent respectivement 64, 59 et 47% de l'eau utile. On observe que : plus l'eau utile est élevée, plus les écarts de fermeture des bilans sont grands ; une part de l'eau utile passe dans les nappes de la plaine et échappe ainsi au jaugeage à l'échelle limnimétrique.

L'équation du bilan moyen annuel s'écrit :

P = ETR - Q - ΔS - $\mathcal{E}$ = 1371 - 800 - 324 - 0 = 247 mm

Année		P	T	ETP	S	Var s	ETR	Eu	Q	Eu-Q
		(mm)	(°c)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
72-73		1404	20.6	874	0	0	800	605	293	311
73-74		**1685**	20.4	866	0	0	**866**	**819**	291	**528**
74-75		1248	20.4	**865**	0	0	766	483	265	219
75-76		1193	20.4	871	0	0	845	**347**	283	**65**
76-77		1359	20.6	872	0	0	854	505	282	223
77-78		1480	20.7	878	0	0	797	683	282	401
78-79		1354	20.6	874	0	0	812	542	**224**	318
79-80		1252	20.7	877	0	0	**730**	523	296	226
80-81		1453	20.7	873	0	0	853	600	328	272
81-82		1272	20.4	867	0	0	807	466	317	149
82-83		1515	21.1	**886**	0	0	806	710	374	335
83-84		**1133**	20.4	870	0	0	751	382	255	127
84-85		1397	20.7	874	0	0	753	643	387	256
85-86		1403	20.8	880	0	0	800	603	472	130
86-87		1414	21.1	885	0	0	767	648	**541**	106
Moy		**1371**	**20.6**	**874**	**0**	**0**	**800**	**571**	**326**	**247**
Max		**1685**	**21.1**	**886**	**0**	**0**	**866**	**819**	**541**	**528**
min		**1133**	**20.4**	**865**	**0**	**0**	**730**	**347**	**224**	**65**

Tableau 5.21. Bilans annuels de la Mpanda à l'axe D.



	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87
P (mm)	1404	1685	1248	1193	1359	1480	1354	1252	1453	1272	1515	1133	1397	1403	1414
ETP (mm)	874	866	865	871	872	878	874	877	873	867	886	870	874	880	885
S (mm)	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ETR (mm)	800	866	766	845	854	797	812	730	853	807	806	751	753	800	767
Eu (mm)	605	819	483	347	505	683	542	523	600	466	710	382	643	603	648
Q (mm)	293	291	265	283	282	282	224	296	328	317	374	255	387	472	541
Ecart (mm)	311	528	219	65	223	402	318	226	272	149	336	127	256	130	106

Fig. V.21 : Variation annuelle des paramètres de la Mpanda à l'axe D.

A la fig.V.21, on peut constater que la lame écoulée calculée à partir des données de Lamheyer (72-81) ne varie pas de façon sensible malgré une augmentation nette de l'eau utile. Si l'on considère seulement les données de Lamheyer (1972-1981), la lame écoulée est égale à 283 mm soit seulement 50% de l'eau utile. L'équation du bilan moyen annuel (72-81) s'écrit :

$$72\text{-}81 : P = ETR - Q - \Delta S = \mathcal{E} = 1381 - 813 - 283 - 0 = 285 \text{ mm}$$

En considérant les données de l'IGEBU (1981-1987), l'eau utile moyenne annuelle est égale à 575 mm et la lame écoulée à 391 mm soit 68% de l'eau utile. L'équation du bilan moyen annuel (81-87) s'écrit :

$$81\text{-}87 : P = ETR - Q - \Delta S = \mathcal{E} = 1356 - 781 - 391 - 0 = 184 \text{ mm}$$

L'écart moyen de fermeture (184 mm) représente 14% des précipitations et 32% de l'eau utile.

Alors que la pluviométrie et l'eau utile moyennes sont quasi égales entre 72-81 et 81-87, on observe une différence de plus de 100 mm entre les lames écoulées.

Nous considérons que les débits déterminés par l'IGEBU à partir de l'échelle limnimétrique (81-87) sont plus fiables que ceux de Lamheyer (72-81) obtenus par reconstitution à partir de quelques données ponctuelles.

V.6.6.4. *Estimation des réserves*

Les courbes de tarissement de la Mpanda à l'axe D sont très irrégulières, elles évoluent en dents de scie et sont différentes d'une année à l'autre (annexe VI.6). Cela est dû probablement aux déviations de la rivière qui sont souvent opérées par les riverains pour irriguer leurs cultures maraîchères situées le long de la rivière, dans la plaine de la Rusizi. Les coefficients α_1 et α_2 déterminés sont repris au tableau 5.15 :

	82-83	83-84	84-85	85-86
α_1	0.02843	0.01774	0.02380	0.02685
α_2	0.00899-0.01105	0.01379	0.01419 –0.01181	0.01361

Tableau 5.22 : Coefficients de tarissement de la Mpanda à l'axe D.

Entre 1982 et 1986, le volume de réserves de la Mpanda à l'axe D est compris entre 1.8 x 10^7 et 1.9 x 10^7 m³, soit une hauteur d'eau comprise entre 38 et 40 mm, la moyenne annuelle est égale à 1.9 x 10^7 m.

Les équations du bilan annuel sont :

83-84 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1133 - 751 - 255 - 0 - 0 = 127 mm
84-85 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1397 - 753 - 387 - 0 + 1 = 258 mm
85-86 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1403 - 800 - 472 - 0 - 2 = 129 mm

Année		P	R	ETP	S	ΔS	ETR	Eu	Q	Vol.Rés	R	ΔR	ε
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	m³	(mm)	(mm)	(mm)
			initiales								finales		
82-83		1515	?	886	0	0	806	710	374	1.9E+07	39	?	
83-84		1133	39	870	0	0	751	382	255	1.9E+07	39	0	127
84-85		1397	39	874	0	0	753	643	387	1.8E+07	38	-1	258
85-86		1403	38	880	0	0	800	603	472	1.9E+07	40	3	129
Moy		**1311**	**38**	**875**	**0**	**0**	**768**	**543**	**372**	**1.9E+07**	**39**	**1**	**170**
X/P				**67%**	**0%**	**0%**	**59%**	**41%**	**28%**		**3%**	**0%**	**13%**

Tableau 5.23 : Bilans hydrogéologiques de la Mpanda à l'axe D.

Par rapport aux autres termes du bilan, on remarque que la variation des réserves est très faible.

L'équation du bilan moyen annuel (83-86) s'écrit :

83-86 : P - ETR - Q - ΔS - ΔR = ε = 1311 - 768 - 372 - 0 - 1= 170 mm

L'écart de fermeture du bilan est égal à 170 mm soit 13% des précipitations et 31% de l'eau utile.

V.6.7. Conclusion

Les caractéristiques physiographiques montrent que les bassins de la Nyakagunda, Muhira, Mpanda à Gatura et Mpanda à l'axe D sont susceptibles de développer des crues plus fortes que les bassins de la Nyamagana, Kaburantwa et Kagunuzi qui sont plus longs et ont des coefficients de compacité plus élevés.

A l'exception du bassin de la Mpanda à l'axe D (1370 mm) dont une bonne partie de sa superficie se trouve dans la plaine, les autres bassins enregistrent une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 1600 mm. La variabilité de la pluviométrie d'une année à l'autre est prononcée.

Les coefficients moyens d'écoulement (1981-1992) obtenus à partir des données de débits de l'IGEBU (1981-1992) sont supérieurs à 0.40 dans les bassins de la Nyakagunda, Nyamagana, Muhira et Kaburantwa et Kagunuzi. Dans le bassin de la Mpanda, Q/P moyen est égal à 0.37 à Gatura et 0.24 à l'axe D.

A cause de la faible variation de la température , l'ETP annuelle varie peu d'une année à l'autre, la moyenne annuelle est comprise entre 814 mm (Kaburantwa) et 874 mm (Mpanda à l'axe D). L 'ETR moyenne annuelle est comprise entre 779 mm (Kaburantwa) et 826 mm (Nyakagunda). Le rapport moyen ETR/ETP varie de 0.92 (Mpanda axe D) à 0.96 (Nyamagana et Kaburantwa).

La hauteur moyenne annuelle d'eau utile est comprise entre 571 mm (Mpanda axe D) et 1038 mm (Kaburantwa), soit 42 à 57% de la pluviométrie moyenne annuelle.

La variation du stock d'humidité du sol d'une année à l'autre reste faible, elle est nulle dans le bassin de la Mpanda à l'axe D.

Les bilans hydrologiques établis ont montré que la lame écoulée n'augmente pas proportionnellement à l'augmentation de l'eau utile, en témoignent les déficits d'écoulement élevés qui sont enregistrés pendant les années

pluvieuses. Durant ces années pluvieuses, une partie du déficit d'écoulement que nous avons observé systématiquement dans tous les bassins, passe dans les dépôts fluvio-lacustres de la plaine de la Rusizi.

Les années pour lesquelles nous avons pu déterminer les réserves du bassin supérieur prouvent que, par rapport aux autres termes du bilan, la variation des réserves reste faible (tableau 5.24).

Paramètre	Nyakagunda	Nyamagana	Muhira	Kaburantwa	Mpanda Gatura	Mpanda Axe D
Année	1982-1986	1984-1987	1982-1987	1986-1990	1983-1987	1983-1987
P (mm)	1599	1815	1667	1930	1583	1311
ETR (mm)	819	807	807	797	763	768
Q (mm)	660	877	735	954	595	372
ΔS (mm)	0	0	0	26	0	0
R (mm)	319	245	158	413	127	39
ΔR (mm)	-3	19	-19	16	-7	1
$\mathcal{E}$ (mm)	123	112	144	163	232	170

Tableau 5.24 : Paramètres du bilan hydrogéologique moyen annuel

Les réserves calculées nous paraissent très élevées pour tous les bassins. Vraisemblablement que les bassins hydrogéologiques ne correspondent pas avec les bassins hydrologiques du fait de la structure géologique très complexe du bassin supérieur (région très faillée). Seule une étude hydrogéologique du bassin supérieur pourrait démontrer la provenance de ces réserves qui restent toujours importantes à la fin de la période de tarissement.

VI. Caractéristiques hydrogéologiques de la basse Rusizi

L'exploitation optimale des nappes d'eaux souterraines nécessite au préalable la détermination des paramètres hydrogéologiques qui définissent leurs fonctions capacitive et hydraulique. L'un des moyens utilisés pour déterminer ces paramètres est l'interprétation des pompages d'essai. Les essais par pompage poursuivent les buts suivants, (G.Castany, 1982) :

- la détermination des caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage ;
- la mesure sur le terrain des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ;
- l'observation directe de l'effet de l'exploitation sur l'aquifère (les prévisions de l'évolution des rabattements en fonction des débits pompés).

VI.1. Définitions

D'après la loi de Darcy , le débit (Q) passant à travers une formation poreuse (fig.VI.1) peut s'exprimer par :

$$Q = KA\frac{\Delta h}{L}$$

avec Q = le débit d'écoulement [L^3T^{-1}]

A = la section perpendiculaire à l'écoulement (L^2)

Δh = la différence de charge en amont et en aval de l'échantillon $[L]$

L = la longueur de l'échantillon $[L]$

$\frac{\Delta h}{L}$ = i = le gradient hydraulique ou perte de charge unitaire (sans dimension)

K = la conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité $[L/T]$

Le coefficient de perméabilité (K) peut être défini comme le volume d'eau (Q) qui s'écoule pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface (A) d'une section de terrain sous un gradient hydraulique (i) égal à l'unité.

$$K = \frac{Q}{Ai}$$

En milieu isotrope, le coefficient de perméabilité, apparaissant dans la loi de Darcy, est un scalaire exprimant de façon globale l'aisance qu'a un fluide à se déplacer à travers la tortuosité des vides (Bear and Verruijt, 1987). Il dépend des propriétés du fluide (densité et viscosité) et du milieu poreux (granulométrie, diamètre des grains, surface spécifique des grains, porosité efficace, classement, degré de compaction). Il peut s'exprimer par :

$$K = \frac{k\rho\, g}{\mu}$$

avec k = la perméabilité intrinsèque du milieu poreux$[L^2]$

ρ = la masse volumique du fluide $[M L^{-3}]$

μ = la viscosité dynamique du fluide $[M L^{-1} T^{-1}]$

g = accélération gravitationnelle$[LT^{-2}]$

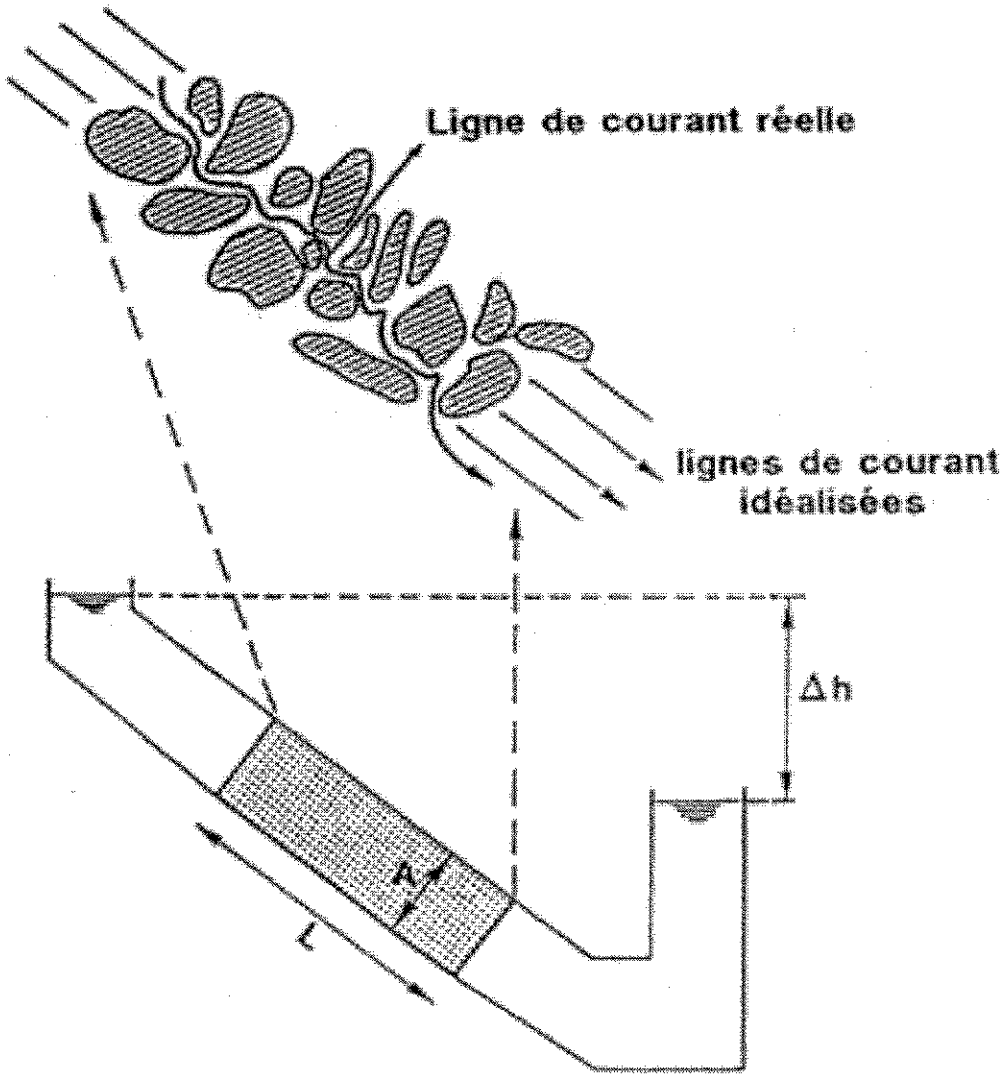


Fig.VI.1 Ecoulement à travers un échantillon poreux.

La plupart des milieux géologiques sont anisotropes : ils présentent des directions préférentielles : plans de stratifications, schistosités et axes de fracturation. Dans de tels milieux, la perméabilité dépend de la direction envisagée.

Dans les formations sédimentaires (fig.VI.2) par exemple, une direction préférentielle d'écoulement est constatée parallèlement au plan de sédimentation.

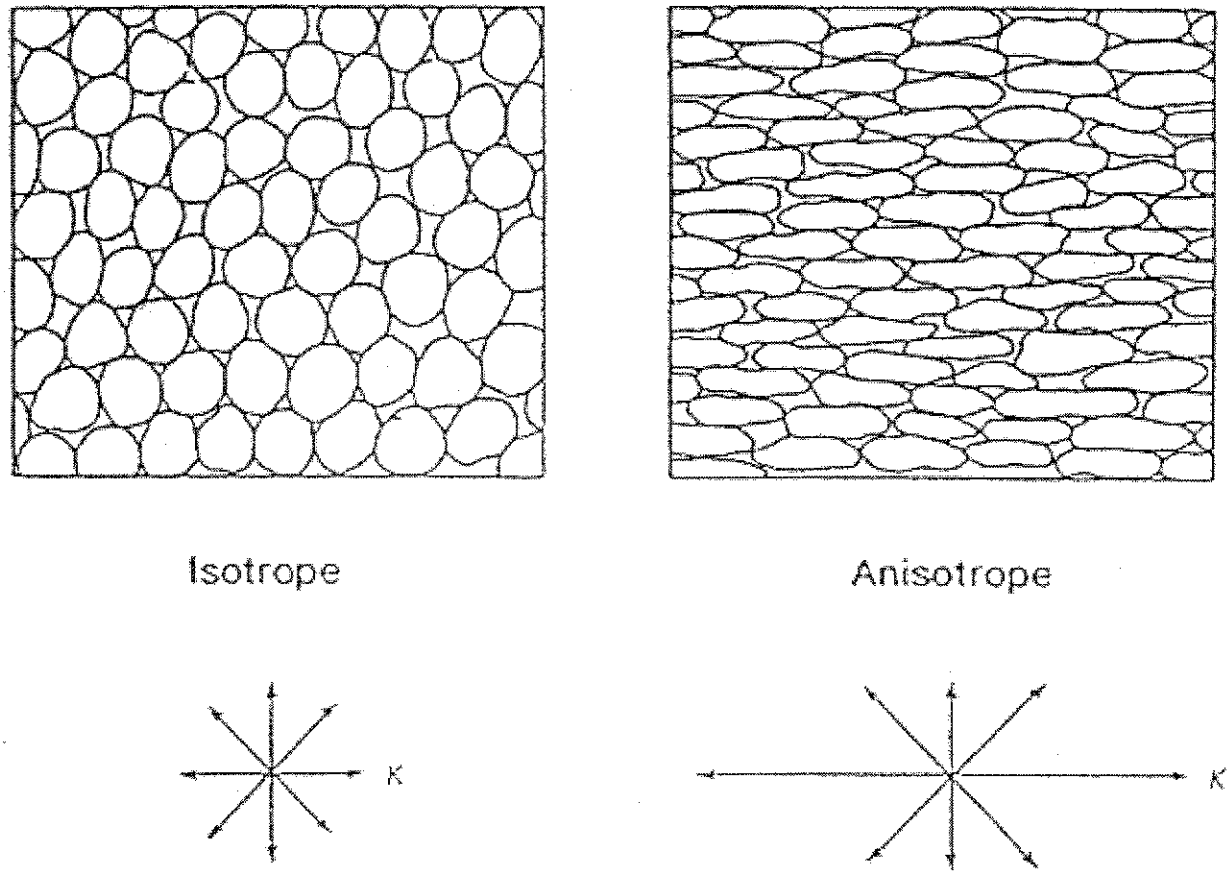


Fig.VI.2 : Influence de la forme des grains sur l'isotropie ou l'anisotropie d'un sédiment (d'après Fetter, 1988).

Un milieu poreux est homogène du point de vue de son coefficient de perméabilité si celui-ci est le même en tout point. Dans la nature, le milieu poreux est souvent hétérogène (fig.VI.3).

En considérant un écoulement parallèle au plan de stratification d'un milieu poreux composé de plusieurs couches, la somme des débits calculés par la loi de Darcy dans chaque couche prise individuellement donne :

$$\sum Q_i = \sum K_i B_i \frac{\Delta h}{L}$$

où B_i est la section d'écoulement de la couche (i)

Parallèlement aux couches, la perméabilité équivalente (valable en termes de débit ou de flux) s'écrit (A. Dassargue, 1995) :

$$K_{eq} = \frac{1}{B}\sum K_i B_i$$

où B est la section totale = $\sum B_i$

Pour un écoulement perpendiculaire aux couches, la perméabilité équivalente vaut :

$$K_{eq} = \frac{\sum B_i .}{\sum (B_i / K_i)}$$

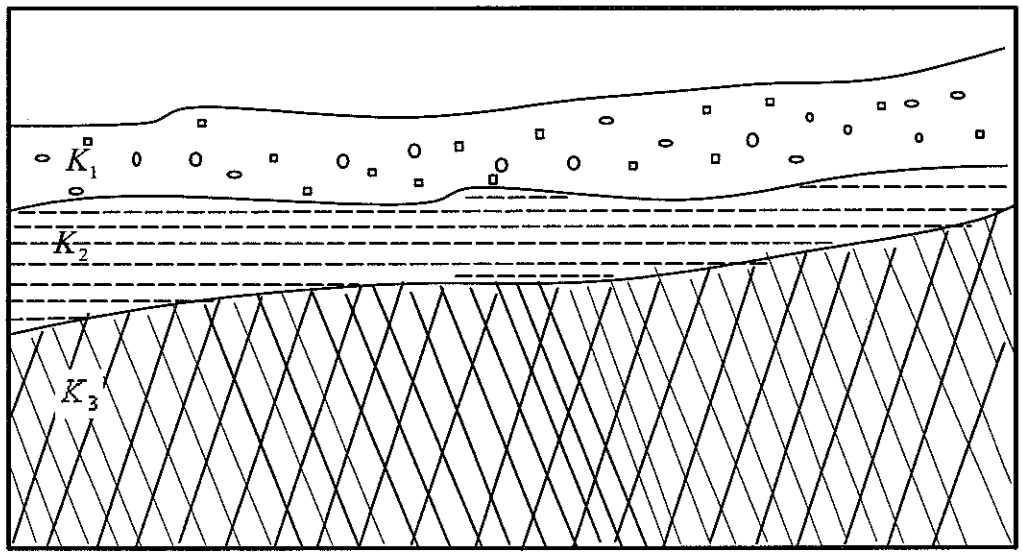


Fig.VI.3 : Milieu hétérogène.

La vitesse de Darcy v_D est définie par la formule :

$$v_D = \text{K.i} = \frac{Q}{A} \qquad \left[\frac{L^3}{LT}\right]$$

Il s'agit d'un flux d'eau (ou débit spécifique).

La vitesse moyenne (v_m) est obtenue en ne considérant que le volume des pores (l'eau ne circule que dans les pores de la roche) :

$$v_m = \frac{Q}{A.n}$$

n = la porosité totale [%]

La vitesse effective est obtenue en considérant seulement les pores interconnectés qui permettent l'écoulement. Pour une porosité efficace (n_e), elle vaut :

$$V_e = \frac{Q}{A.ne}$$

n_e = porosité efficace [%]

La porosité totale (n) est le rapport du volume des vides (V_v) pouvant être occupés par l'eau au volume total de la roche(V_t) :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \qquad [\%]$$

La porosité efficace (n_e) est le rapport du volume gravifique dans une roche saturée à celui du volume totale de la roche.

La transmissivité (T) d'un aquifère caractérise l'aptitude de l'aquifère à transmettre l'eau horizontalement, elle dépend de la conductivité hydraulique (K) et de l'épaisseur (e) du matériau aquifère.

$$T = K\,e \quad [L^2T^{-1}]$$

Le coefficient d'emmagasinement est le volume d'eau libéré (ou stocké) par unité de surface d'aquifère pour une baisse (ou augmentation) unitaire de niveau piézométrique.

VI.2. Méthodes d'interprétation des pompages d'essai

Plusieurs solutions analytiques des différentes équations de l'écoulement de nappes vers les ouvrages de captage ont été proposées par de nombreux chercheurs: Dupuit (1863), Theis (1935), Jacobs (1946) etc... Elles permettent de déterminer les caractéristiques de la nappe et de l'ouvrage de captage lui-même, de calculer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et de suivre le comportement de l'aquifère pendant son exploitation.

VI.2.1. Méthode de Dupuit

Les formules de Dupuit sont utilisées dans les cas de mesures réalisées en conditions de régime stabilisé de pompage (en régime d'équilibre). Les problèmes à résoudre au niveau et autour du puits sont habituellement idéalisés. Les hypothèses suivantes sont posées :

- l'eau et la roche sont incompressibles ;
- la vitesse horizontale de l'eau est constante sur une même verticale (les surfaces équipotentielles sont planes) ;
- l'aquifère a une extension latérale considérée comme illimitée par rapport à sa dimension verticale, si bien que la composante verticale de la vitesse est faible par rapport à sa composante horizontale ;

- les limites supérieure et inférieure de l'aquifère sont considérées horizontales ;

- la formule de Darcy est applicable ;

- le terrain est homogène et isotrope ;

- le rayon d'influence du captage est constant dans le temps ;

- l'ouvrage capte la nappe sur toute son épaisseur.

VI.2.1.1. *Nappe libre*

Dans le cas d'une nappe libre convergente (fig.VI.4), le débit Q allant vers le puits au travers d'une section cylindrique située à une distance x du puits est exprimé par la formule :

$$Q = 2\pi x y K \frac{dy}{dx} \qquad \text{(VI.1)}$$

Par intégration et introduction des distances limites r et R présentant les hauteurs piézométriques correspondantes h et H, l'équation VI.1 devient :

$$Q = \pi K \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}} = 1{,}366 K \frac{H^2 - h^2}{\log \frac{R}{r}} \qquad \text{(VI.2)}$$

avec R = rayon d'influence (m)
r = rayon efficace du puits (m)
K = conductivité hydraulique du milieu (m/s)
H = hauteur piézométrique initiale (m)
h = hauteur d'eau dans le puits (m)

$H - h = \Delta$ = rabattement (m)

$$Q = 1{,}366 K \frac{\Delta(2H - \Delta)}{\log \frac{R}{r}} = C\Delta(2H - \Delta) = C\Delta^2 - 2H\, C\Delta \qquad \text{(VI.3)}$$

où $C = \dfrac{1{,}366 K}{\log \frac{R}{r}}$

Le débit Q est fonction :

- du rabattement Δ ;

- de la hauteur d'eau initiale H ;
- du coefficient de perméabilité K ;
- du rayon d'action R et du rayon de puits r.

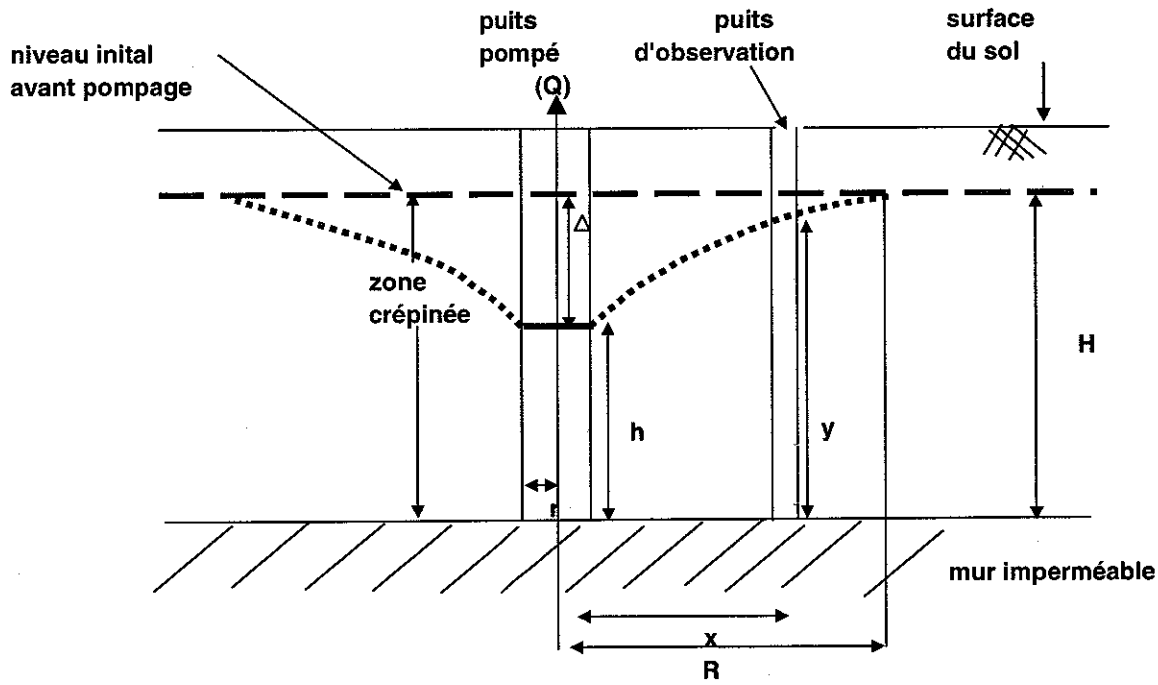


Fig.VI.4 : Nappe libre convergente.

La courbe rabattement – débit (fig.VI.5) est de type parabolique ($y = ax^2 - abx$), elle donne des renseignements à propos du puits et de son comportement, notamment la plage de débits dans laquelle il est utilisable et d'éventuelles pertes de charge.

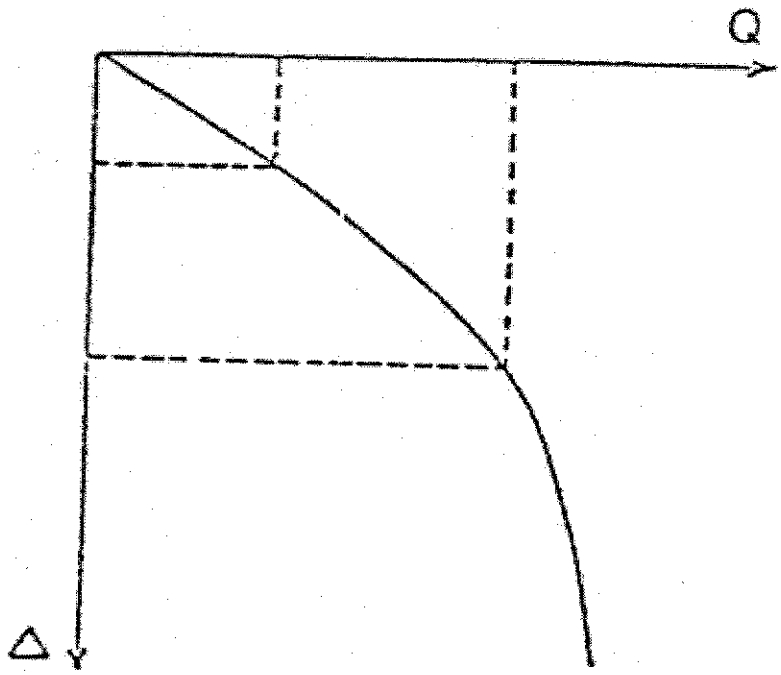


Fig.VI.5 : Nappe libre : courbe rabattement - débit

Le débit spécifique est le volume d'eau puisé par unité de temps et pour une unité de rabattement. Il est exprimé par :

$$q_{\Delta} = \frac{Q}{\Delta} = C(2H - \Delta)$$

Le débit spécifique diminue quand le rabattement augmente et la courbe débit spécifique – rabattement est une droite (fig.VI.6).

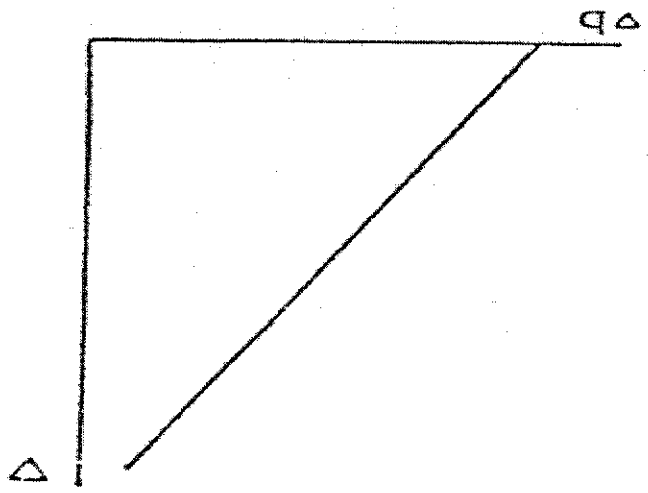


Fig.VI.6 : Nappe libre : courbe rabattement – débit spécifique.

VI.2.1.2. *Nappe captive*

Dans le cas d'une nappe captive (fig.VI.7), l'épaisseur (e) de la section d'écoulement est supposée constante. On a :

$$Q = 2\pi x e k \frac{dy}{dx} \qquad \text{(VI.4)}$$

En intégrant l'équation (VI.4), on obtient :

$$Q = 2\pi K e \frac{H-h}{\ln \frac{R}{r}} = 2.73 K e \frac{H-h}{\log \frac{R}{r}} \qquad \text{(VI.5)}$$

si on pose $\Delta = H - h$ et $C = 2.73 \frac{Ke}{\log \frac{R}{r}}$

alors

$$Q = C\Delta \qquad \text{(VI.6)}$$

Le débit Q est fonction :

- du rabattement ;
- de la transmissivité K e ;
- du rayon d'action R et du rayon du puits r.

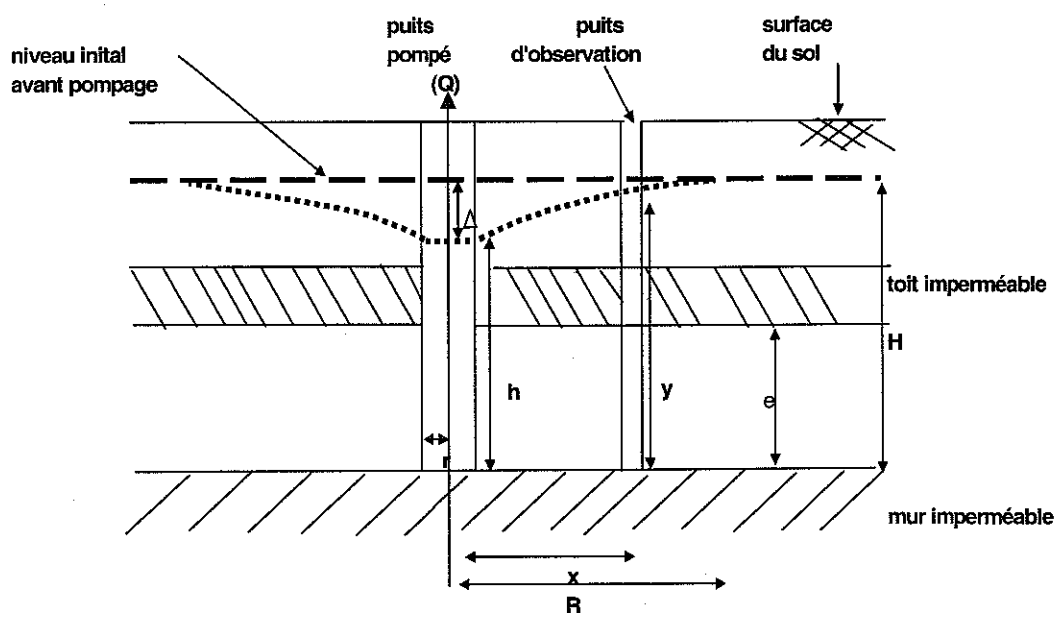


Fig.VI.7 : Nappe captive convergente.

La courbe rabattement – débit est une droite de coefficient angulaire

$$C = 2.73\frac{Ke}{\log\frac{R}{r}}$$

Le débit spécifique est une constante et vaut :

$$q_\Delta = \frac{Q}{\Delta} = C$$

Pour des rabattements importants dans le puits, on utilise la formule approchée de C.E.Jacobs :

$$\Delta = H - h = \frac{Q}{2\pi Ke}\ln\frac{R}{r} + BQ^n \qquad \text{(VI.7)}$$

$$\Delta = CQ + BQ^n \text{ avec } C = \frac{\ln\frac{R}{r}}{2\pi Ke}$$

BQ^n = facteur tenant des pertes de charges dues aux rabattements.

Généralement, on admet : $\Delta = CQ + BQ^2$

VI.2.2. Méthode de Theis

L'équation de Theis permet de déterminer les paramètres hydrodynamiques d'une nappe captive dans des conditions de régime transitoire. Les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- l'aquifère est homogène et isotrope ;
- la nappe est infinie et à épaisseur constante;
- il n'y a aucun écoulement initial ;
- le puits est complet et son diamètre est très faible, ce qui permet de négliger l'emmagasinement dans le volume du puits ;
- l'eau provenant de l'emmagasinement est libérée instantanément avec la baisse de la charge hydraulique.

L'équation de Theis s'écrit :

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad \text{(VI.8)}$$

Δ = le rabattement ;

$W(u)$ est une fonction exponentielle intégrale :

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -\gamma - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u^n}{n(n!)} \qquad \text{(VI.9)}$$

γ = constante d'Euler = 0.57721 56649 .....

$u = \frac{x^2 S}{4Tt}$ (variable de la fonction w)

Q = le débit de pompage;

T = la transmissivité ;

S = le coefficient d'emmagasinement ;

t = le temps de pompage ;

x = la distance qui sépare le piézomètre du puits.

La fonction $W(u)$ est donnée en échelle bi-logarithmique. Après le pompage d'essai, les résultats sont reportés en diagramme bi-logarithmique avec en ordonnées le rabattement Δ et en abscisse $\frac{x^2}{t}$. On superpose la courbe expérimentale à la courbe standard en maintenant les axes de coordonnées parallèles entre eux (fig.VI.8). Pour un point quelconque des deux courbes confondues, on lit :

- $W(u)$ et u sur les axes de coordonnées de la courbe théorique ;

- Δ et $\frac{x^2}{t}$ sur les axes de coordonnées de la courbe expérimentale.

On calcule T et S par les formules :

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta} W(u) \qquad \text{(VI.10)}$$

$$S = \frac{4Tt}{x^2} u \qquad \text{(VI.11)}$$

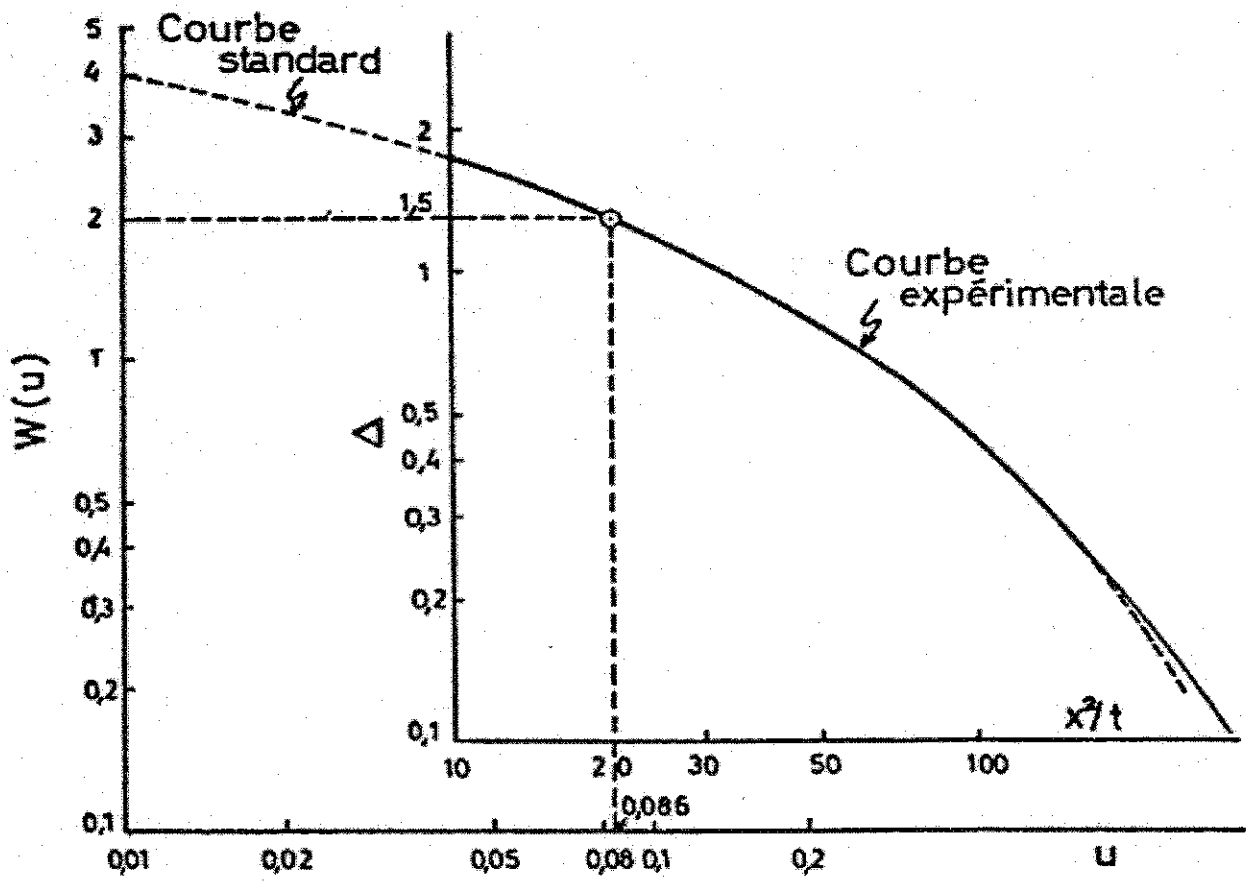


Fig.VI.8 : Méthode de Theis : Courbes standard et expérimentale.

Si la durée de pompage est grande et x est petit, l'équation de Theis admet une approximation logarithmique (la série infinie de W(u) tronquée après le deuxième terme donne) :

$$W(u) = -\gamma - \ln(u) = -0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)$$

En utilisant cette approximation, on obtient la formule approchée de Jacobs

$$\Delta = \frac{Q\,W(u)}{4\pi T} \ln\frac{2.25\,Tt}{x^2 S} = \frac{0{,}183\,Q}{T} \log\frac{2.25\,Tt}{x^2 S} \qquad \text{(VI.12)}$$

La formule de Jacobs est utilisée dans les différentes options de pompages :

a) Essai de nappe à débit constant

Sur un diagramme semi-logarithmique, les rabattements mesurés sont reportés en ordonnées à échelle arithmétique et le temps en abscisses à échelle logarithmique (fig. VI.9).

$$\Delta = \frac{0.183Q}{T}\log\frac{2{,}25T}{x^2S} + \frac{0.183Q}{T}\log t$$

$$\Delta = f(\log t)$$

on obtient une droite ayant :

- le coefficient angulaire $C = \frac{0.183Q}{T}$, d'où $T = \frac{0.183Q}{C}$
- l'abscisse à l'origine t_0 est telle que $\frac{2.25Tt_0}{x^2S} = 1$ d'où $S = \frac{2.25Tt_0}{x^2}$

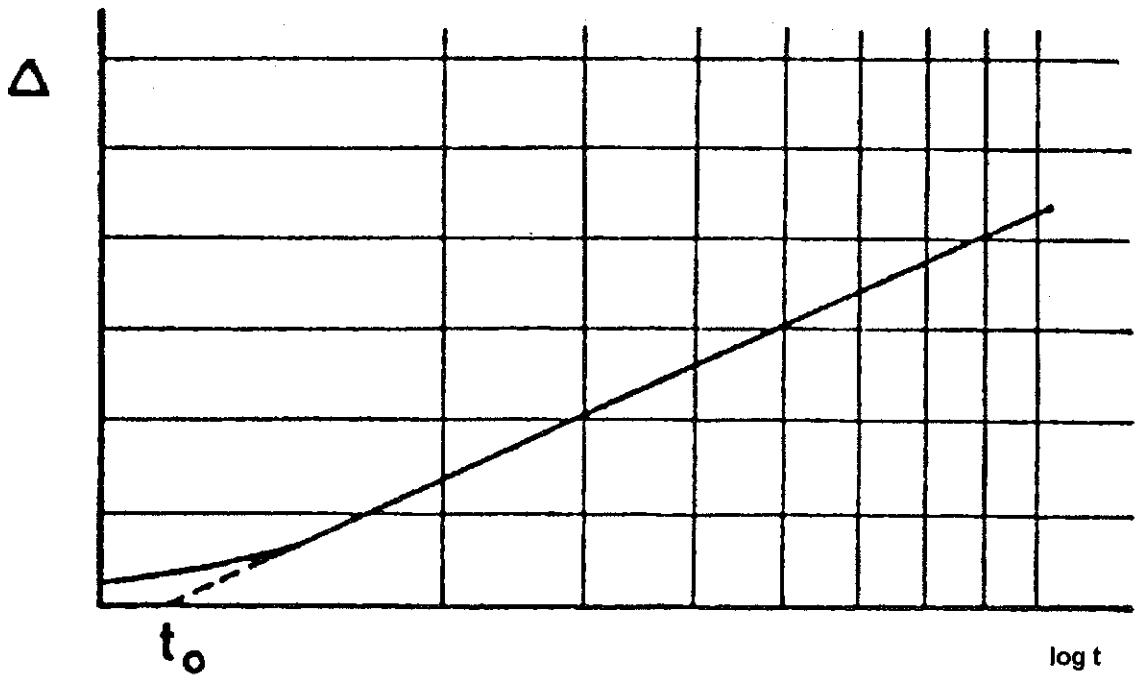


Fig.VI.9 : Courbe $\Delta = f(\log t)$.

b) Essai par paliers de plusieurs débits constants

Les pompages s'effectuent à des débits Q_1, Q_2, Q_3... et l'on enregistre en fonction du temps les rabattements Δ_1, Δ_2, Δ_3... en un point situé à une distance x du puits. Généralement, les débits sont croissants, c'est-à-dire que $Q_1 < Q_2 < Q_3 < \ldots$.

$$\frac{\Delta}{Q} = \frac{0,183}{T}\log\frac{2,25T}{x^2S} + \frac{0,183}{T}\log t$$

$$\frac{\Delta}{Q} = f(\log t)$$

Sur le diagramme semi-logarithmique (fig.VI.10) :

- le coefficient angulaire $C = \frac{0,183}{T}$, d'où $T = \frac{0,183}{C}$
- l'abscisse à l'origine t_0 est telle que $\frac{2,25Tt_0}{x^2S} = 1$ d'où $S = \frac{2,25T\,t_0}{x^2}$

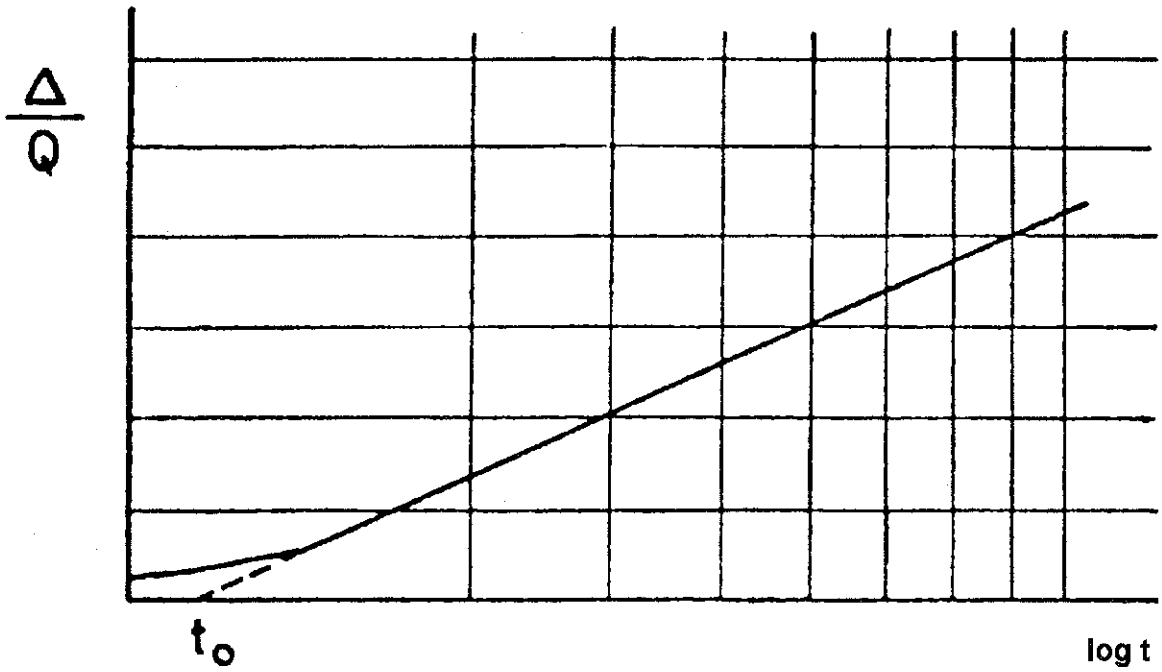


Fig.VI.10 : Courbe $\frac{\Delta}{Q} = f(\log t)$.

c) Essai de nappe avec plusieurs piézomètres

Si l'on considère un pompage à un débit constant et qu'on effectue des mesures de rabattements dans des piézomètres situés à des distances x_1, x_2, x_3... du puits, T et S sont déterminés à partir de l'équation :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T}\log\frac{2,25T}{S} + \frac{0,183Q}{T}\log\frac{t}{x^2}$$

$$\Delta = f(Log\frac{t}{x^2})$$

En diagramme semi-logarithmique avec Δ en ordonnée et $\log\frac{t}{x^2}$ en abscisse (fig.VI.11) on obtient une droite dont :

- le coefficient angulaire $C=\frac{0,183Q}{T}$, d'où $T=\frac{0,183Q}{C}$

l'abscisse à l'origine $(\frac{t}{x^2})$ est telle que $\frac{2,25T}{S}(\frac{t}{x^2})_0=1$, d'où $S=2,25T\left(\frac{t}{x^2}\right)_0$

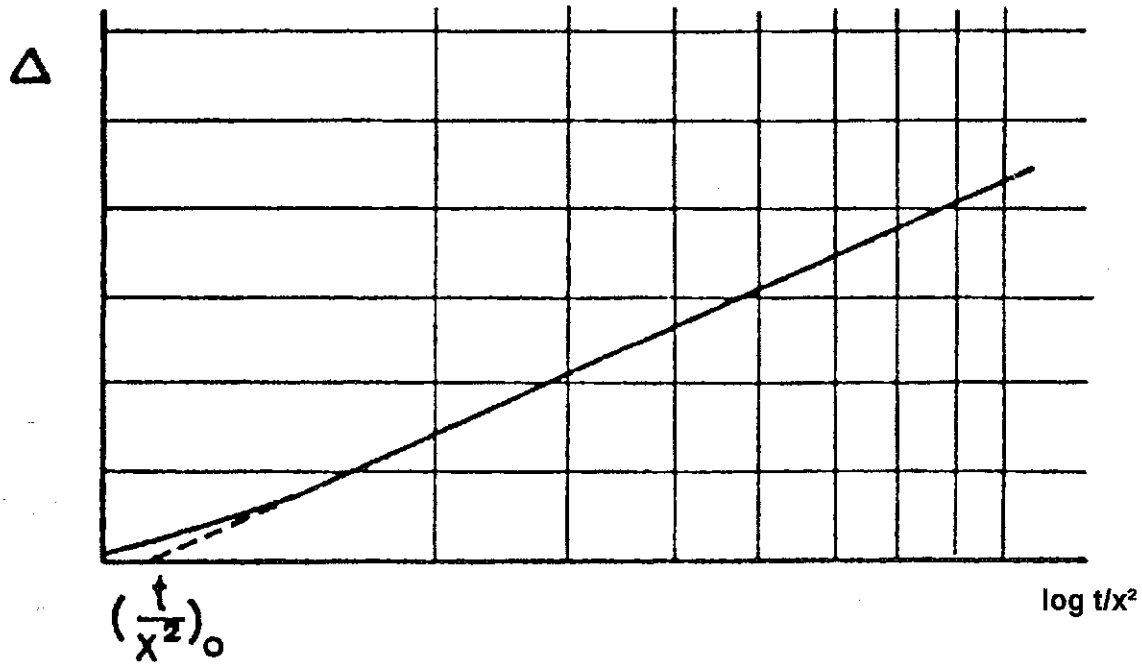


Fig.VI.11 : Courbe $\Delta=f(\log\frac{t}{x^2})$.

Si on considère plusieurs pompages à des débits Q_1, Q_2, Q_3... et si on effectue des mesures de rabattements dans des piézomètres situés à des distances x_1, x_2, x_3... du puits, les rabattements spécifiques sont donnés par l'équation :

$$\frac{\Delta}{Q}=\frac{0,183}{T}\log\frac{2,25T}{S}+\frac{0,183}{T}\log\frac{t}{x^2}$$

Sur un diagramme semi-logarithmique (fig.VI.12), on a :

- le coefficient angulaire $C=\frac{0,183}{T}$, d'où $T=\frac{0,183}{C}$
- l'abscisse à l'origine $(\frac{t}{x^2})_0$ est telle que $\frac{2,25T}{S}(\frac{t}{x^2})_0=1$, d'où $S=2,25T(\frac{t}{x^2})_0$

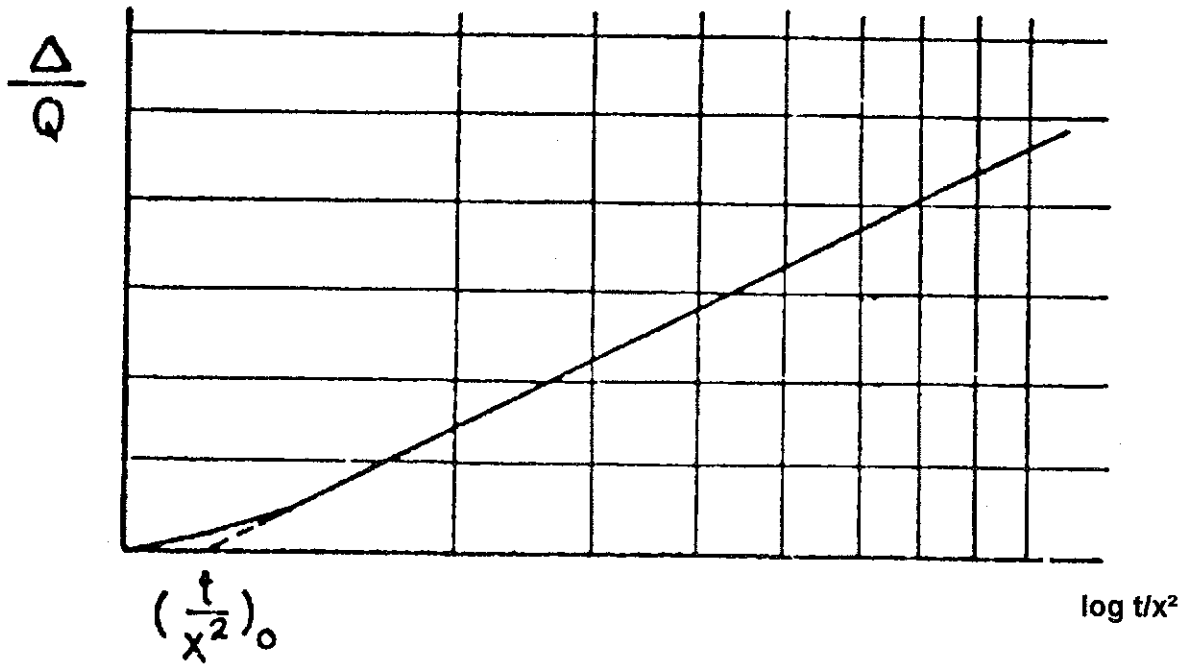


Fig.VI.12 : Courbe $\frac{\Delta}{Q} = f(\log\frac{t}{x^2})$.

En présence des phénomènes de drainance, la nappe n'est plus considérée comme captive, on introduit les paramètres suivants :

- le paramètre de drainance $\frac{K'}{b'}$ qui caractérise la capacité de la couche semi-perméable du toit ou du mur, à transmettre l'eau verticalement :

  - K' est la perméabilité de la couche semi-perméable,

  - b' est l'épaisseur de cette couche ;

- le facteur de drainance B qui caractérise les effets de drainance dans les nappes semi-captive : $B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}}$

Parmi les méthodes tenant compte de ces phénomènes, on peut citer :

- la méthode bi-logarithmique de Walton ;

- la méthode semi-logarithmique de Hantush ;

- la méthode du régime stabilisé bi-logarithmique de Jacob.

VI.3. Conductivités hydrauliques et transmissivités de la basse Rusizi.

Pour rappel, la nappe aquifère de la basse Rusizi est constituée de sables graveleux d'origine fluviatile, de sables fins d'origine lacustre et de sables grossiers de cordons littoraux aux abords du lac Tanganyika. L'épaisseur de la nappe est très variable, inférieure à 5 m dans les dépôts fluviatiles, elle peut atteindre 10 m dans les dépôts lacustres.

Les perméabilités sont déterminées à partir des essais de pompage réalisés dans 70 forages implantés dans la partie burundaise et 13 forages dans la partie congolaise. Dans la partie burundaise, la majorité de forages sont distants de plus ou moins 2000 m et alignés le long des pistes transversales (direction Est-Ouest). Les pistes transversales sont espacées de plus ou moins 1260 m .

Les transmissivités sont calculées à partir des perméabilités et de l'épaisseur de la nappe. Dans certains forages où l'épaisseur n'est pas connue, T a été calculée à partir des débits spécifiques déterminés par A.Waleffe (1985).

VI.3.1. Conductivités hydrauliques

Dans la partie burundaise les essais de puits ont été réalisés par paliers à 1, 2 et 4 m³/h et les rabattements de la nappe ont été mesurés pour chaque régime de pompage. Les débits spécifiques calculés à 4m³/h varient de 0,58 m³/h m à 133,33 m³/h m.

Dans la partie congolaise , le débit maximum pompé est égal à 2,4 m³/h. Par rapport à la partie burundaise, on enregistre des rabattements qui dépassent 2 m (Ki 43 et Ki 53) malgré des débits faibles obtenus (entre 0.5 et 2.4 m³/h). Les débits spécifiques dans cette partie de la plaine varient entre 0,95 et 9,60 m³/h m.

Les perméabilités ont été calculées par la méthode de Dupuit à un débit de 4 m³/h, en considérant que la nappe est captive sur toute l'étendue de la plaine. En effet, une remontée de la nappe aquifère de plusieurs mètres (pouvant même dépasser 15 m) a été observée lors du forage de puits, (Waleffe, 1985).

$$K = \frac{Q}{2.73e} \frac{\log \frac{R}{r}}{H-h}$$

avec Q = 4 m³/h

r = 0,075 m (rayon du puits)

R = 150 m (rayon d'influence)

$\log \frac{R}{r} = 3{,}30$

e = épaisseur crépinée de l'aquifère (m)

H = niveau statique (m)

h = niveau dynamique (m)

H - h = Δ = rabattement (m)

Remarque : N'ayant pas de piézomètres autour des forages, le rabattement utilisé dans le calcul du coefficient de perméabilité est celui observé dans le forage lui-même et le rayon d'influence est considéré comme égal à 150 m autour de chaque forage.

Les tableaux 6.I et 6.2 reprennent les valeurs de coefficients de perméabilité calculées respectivement dans la partie congolaise et burundaise de la plaine. En fonction de ces valeurs, nous avons établi une carte de répartition spatiale des conductivités hydrauliques (fig. VI.13). La plaine est divisée en plusieurs zones sur base de l'intervalle de variation des perméabilités. Cependant, on peut rencontrer l'une ou l'autre valeur de perméabilités qui sort de l'intervalle défini. Ces valeurs sont marquées en gras au tableau 6.2.

Forage	H	h	Δ	e	Q	K		Forage	H	h	Δ	e	Q	K
	(m)	(m)	(m)	(m)	m³/h	(m/s)			(m)	(m)	(m)	(m)	m³/h	(m/s)
1														
Ki 43	821.50	819.40	2.1	11.00	2	2.9E-05		Ki 192	791.90	791.10	0.8	5.50	2.4	1.8E-04
Ki 51	797.96	795.15	2.81	3.00	0.5	2.0E-05		Ki 39	797.00	796.10	0.9	3.00	2	2.5E-04
Ki 41	793.10	791.60	1.5	2.50	0.5	4.5E-05		Ki 199	789.40	788.15	1.25	3.60	2	1.5E-04
2								KI 221	790.00	789.40	0.6	5.50	2.4	2.4E-04
Ki 37	806.70	806.70	0	4.50	2			Ki 222	790.20	789.50	0.7	3.50	2.4	3.3E-04
KI 225	798.90	798.30	0.6	3.50	2	3.2E-04		Ki 52-1	782.80	782.57	0.23	8.50	1.8	3.1E-04
Ki 197	801.90	801.00	0.9	3.50	2.4	2.6E-04		3						
Ki 38	806.50	806.20	0.3	14.50	2	1.5E-04		Ki 223	804.10	803.85	0.25	4.50	2.4	7.2E-04

Tableau 6.1 : Conductivités hydrauliques de la partie congolaise

Forage	H	h	Δ	e	Q	K		Forage	H	h	Δ	e	Q	K
	(m)	(m)	(m)	(m)	m³/h	(m/s)			(m)	(m)	(m)	(m)	m³/h	(m/s)
4								11						
Ru 161	801.88	800.75	1.13	4.45	4	2.7E-04		Ru 133	808.35	807.50	0.85	5.00	4	3.2E-04
Ru 159	805.85	804.20	1.65	18.65	4	**4.4E-05**		Ru 127	795.00	793.79	1.21	9.00	4	1.2E-04
Ru 158	801.35	801.25	0.10	4.00	4	3.4E-03		Ru 151	807.80	807.31	0.49	16.35	4	1.7E-04
Ru 157	808.30	807.00	1.30	7.93	4	1.3E-04		Ru 154	810.85	810.12	0.73	9.15	4	2.0E-04
Ru 123	797.50	797.32	0.18	5.20	4	1.4E-03		Ru 116	798.66	794.70	3.96	2.70	4	1.3E-04
5								Ru 118	805.20	804.45	0.75	4.20	2	2.1E-04
Ru 139	786.74	783.77	2.97	17.64	4	**2.6E-05**		Ru 113	788.39	787.80	0.59	7.10	4	3.2E-04
Ru 137	787.76	786.30	1.46	4.70	4	2.0E-04		Ru 109	800.00	793.06	6.94	9.50	4	**2.0E-05**
Ru 138	790.95	790.19	0.76	10.00	4	1.8E-04		Ru 110	802.15	801.58	0.57	6.94	4	3.4E-04
Ru 131	786.95	782.80	4.15	2.00	4	1.6E-04		Ru 140	794.39	793.73	0.66	1.00	4	2.0E-03
Ru 135	785.20	784.05	1.15	10.34	4	1.1E-04		12						
6								Ru 107	785.97	785.63	0.34	7.00	4	5.6E-04
Ru 150	819.55	819.20	0.35	2.00	4	1.9E-03		Ru 102	781.36	780.83	0.53	3.53	4	7.2E-04
Ru 162	830.00	829.74	0.26	1.75	4	3.0E-03		Ru 103	784.82	783.83	0.99	2.30	4	5.9E-04
Ru 148	816.16	816.09	0.07	2.00	4	**9.6E-03**		Ru 238	777.35	760.60	16.75	22.00	24	**2.2E-05**
Ru 143	812.12	812.05	0.07	5.87	4	3.3E-03		13						
Ru 155	817.25	816.97	0.28	4.00	4	1.2E-03		Ru 115	791.20	790.98	0.22	4.44	4	1.4E-03
Ru 119	803.00	802.50	0.5	3.10	4	8.7E-04		Ru 106	790.8	790.8	0	4.4	4	?
Ru 136	811.3	811.3	0	5.68	4	?		Ru 105	786.77	786.50	0.27	2.60	4	1.9E-03
Ru 141	813.25	813.03	0.22	6.00	4	1.0E-03		14						
Ru 121	802.77	795.92	6.85	9.00	4	**2.2E-05**		Ru 104	782.80	782.34	0.46	3.00	4	9.7E-04
Ru 130	802.40	801.80	0.6	2.70	4	8.3E-04		Ru 168	777.50	777.26	0.24	5.70	4	9.8E-04
7								Ru 174	774.00	773.91	0.09	5.00	4	3.0E-03
Ru163	852.40	852.12	0.28	7.00	4	6.9E-04		Ru 169	770.41	770.32	0.09	14.33	4	1.0E-03
Ru 160	827.10	823.70	3.4	3.50	4	1.1E-04		Ru 177	774.53	774.35	0.18	5.70	4	1.3E-03
Ru 156	824.30	822.35	1.95	4.00	4	1.7E-04		15						
8								Ru 166	779.19	779.10	0.09	1.80	4	8.3E-03
Ru 164	831.70	831.62	0.08	2.50	4	6.7E-03		Ru 172	771.68	771.61	0.07	3.00	4	6.4E-03
Ru 165	828.55	828.33	0.22	1.90	4	3.2E-03		Ru 173	776.50	776.44	0.06	3.00	4	7.5E-03
Ru 142	822.26	822.15	0.11	2.00	4	6.1E-03		Ru 175	772.36	772.32	0.04	10.00	4	3.4E-03
9								16						
Ru 134	822.27	822.23	0.04	1.70	4	2.0E-02		Ru 152	794.80	792.80	2	0.50	4	1.3E-03
Ru 132	831.37	831.37	0	4.5	4	?		Ru 147-1	785.00	784.46	0.54	2.00	4	1.2E-03
Ru 122	810.38	810.37	0	0.52	4	?		Ru 147-2	787.44	787.40	0.04	10.00	4	3.4E-03
Ru 125	813.85	813.70	0.15	0.40	4	**2.2E-02**		Ru 167-1	795.80	795.76	0.04	5.80	4	5.8E-03
10								Ru 167-2	791.70	791.25	0.45	0.75	4	4.0E-03
Ru 126	816.00	814.60	1.4	1.00	4	9.6E-04		Ru 170-1	805.90	805.68	0.22	3.00	4	2.0E-03
Ru 129	824.05	823.90	0.15	1.45	4	6.2E-03		Ru 170-2	805.92	805.88	0.04	3.70	4	9.1E-03
Ru 146	810.40	810.31	0.09	4.32	4	3.5E-03		Ru 170-3	812.44	812.02	0.42	3.00	4	1.1E-03
Ru 149	808.30	808.27	0.03	6.65	4	6.7E-03		Ru 170-4	811.58	811.37	0.21	1.00	4	6.4E-03
Ru 128	804.35	804.25	0.1	4.00	4	3.4E-03		Ru 153	803.40	800.22	3.18	3.00	4	**1.4E-04**
Ru 117	800.9	800.9	0	4	4	?								

Tableau 6.2: Conductivités hydrauliques de la partie burundaise.

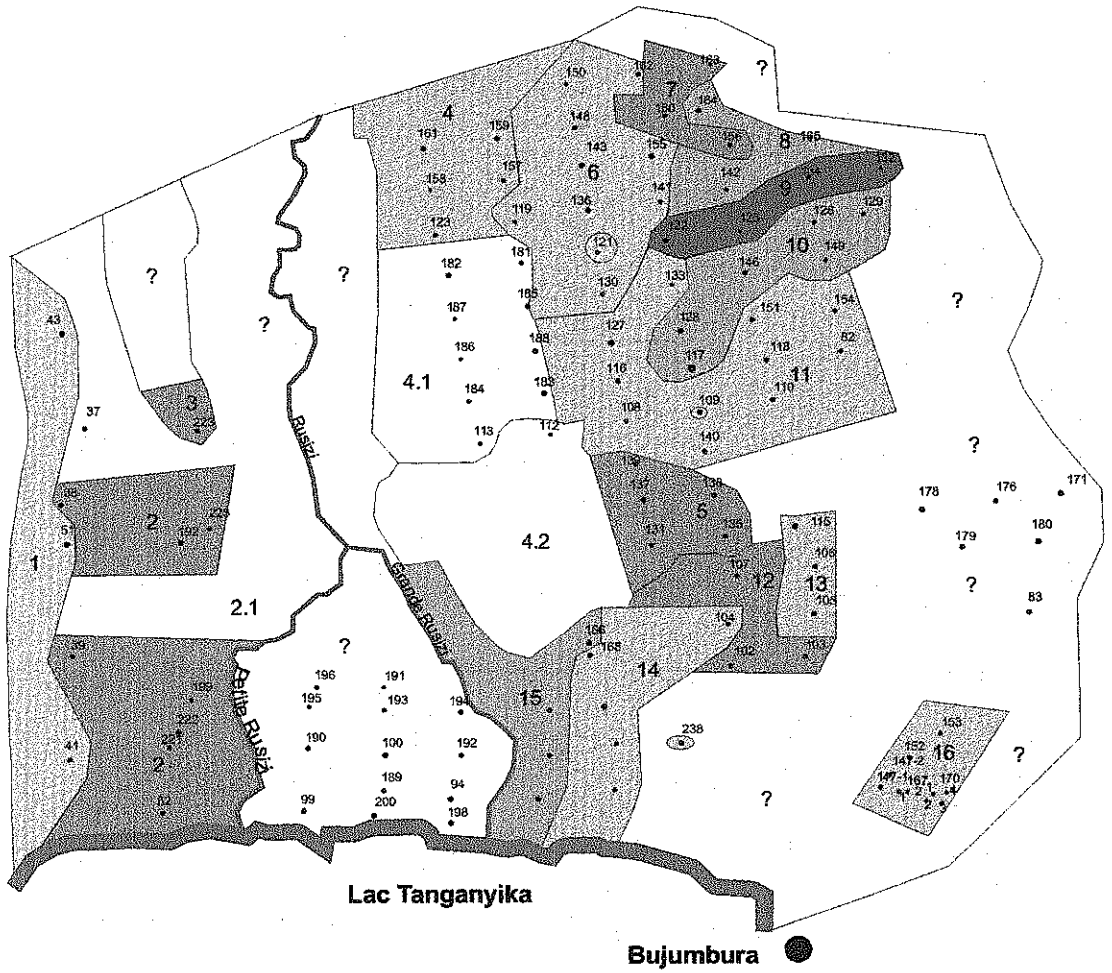


Fig.VI.13: Répartition spatiale des conductivités hydrauliques (K en m/s)

(Obtenue par essais de pompage)

Dans la partie congolaise, tous les forages ont été implantés dans les dépôts fluviatiles, à l'exception du forage Ki 223 qui est localisé dans les dépôts lacustres. Les perméabilités de cette partie de la plaine varient de 2.0×10^{-5} à $7.2\times10^{-4} m/s$. Trois zones sont mises en évidence :

- la zone 1 est située à la limite entre la plaine et les contreforts, l'aquifère est constitué d'un mélange de sable fin à grossier, argileux, avec du gravier par endroits. Ici, les rabattements de la nappe atteignent parfois 2.80 m (Ki 51) à un débit de 0,5 m³/h. La conductivité hydraulique (K) de cette zone est comprise entre 2×10^{-5} et $4.5\times10^{-5} m/s$;

- la zone 2 est située aux abords de la Rusizi et du lac Tanganyika, l'aquifère est constitué d'un sable fin à grossier, quartzeux, K est comprise entre 1.5×10^{-4} et $3.3\times10^{-4} m/s$;

- la zone 3, localisée dans les dépôts lacustres, a été explorée par le forage Ki 223, l'aquifère est constitué d'un sable fin graveleux, K est égale à $7.2\times10^{-4} m/s$.

La partie burundaise de la plaine, investiguée par plusieurs forages, affiche une forte variation de conductivités hydrauliques. Les valeurs de K varient entre 2.0×10^{-5} (Ru 109) et $2.2\times10^{-2} m/s$ (Ru 125).

Dans les dépôts lacustres qui occupent la partie centrale de la plaine, deux zones sont mises en évidence :

- la zone 4 : l'aquifère est un sable fin à grossier argileux, les valeurs de K sont comprises entre 1.3×10^{-4} et $3.4\times10^{-3} m/s$. Exceptionnellement, une valeur faible ($4.4\times10^{-5} m/s$) a été calculée au forage Ru 159 ;

- la zone 5 : l'aquifère est constitué d'un sable fin argileux et affiche des valeurs comprises entre 1.1×10^{-4} et 2×10^{-4} m/s, à l'exception du forage Ru139 où la perméabilité de l'aquifère est égale à $2.6\times10^{-5} m/s$.

On observe que dans les dépôts lacustres, la zone 4 est plus perméable que la zone 5.

Dans les dépôts fluviatiles, les perméabilités varient entre 2.0×10^{-5} et 2.2×10^{-2} m/s, on y distingue :

- la zone 6 : l'aquifère est constitué de gravier sableux, sable grossier et/ou graveleux, les valeurs de K sont comprises entre 8.3×10^{-4} et $3\times10^{-3} m/s$. La conductivité hydraulique calculée au forage Ru 121(K = $2.2\times10^{-5} m/s$) sort de l'intervalle défini ;

- la zone 7 est constitué de sable graveleux argileux, les valeurs de K sont comprises entre 1.1×10^{-4} et $6.9\times10^{-4} m/s$;

- la zone 8 : l'aquifère est constitué de sables graveleux, les valeurs de K sont comprises entre 3.2×10^{-3} et $6.7\times10^{-3} m/s$;

- la zone 9 : l'aquifère est constitué de sable grossier graveleux. Les valeurs de K sont comprises entre 2×10^{-2} et $2.2\times10^{-2} m/s$, c'est la zone la plus perméable de toute la plaine ;

- la zone 10 : l'aquifère est constitué de sable fin à grossier, argileux et présente des conductivités comprises entre $9.6\times10^{-4} m/s$ et $6.7\times10^{-3} m/s$;

- la zone 11 est constituée de sable fin à grossier et présente des valeurs de K qui sont comprises entre 1.2×10^{-4} et $2.0\times10^{-3} m/s$, à l'exception du forage Ru 109 (K = $2\times10^{-5} m/s$) ;

- la zone 12 est constituée de sables fin à moyen, argileux , les valeurs de K sont comprises entre 5.6×10^{-4} et $7.2\times10^{-4} m/s$, à l'exception du forage Ru 238 localisé au Sud de la zone qui affiche une valeur de k très faible (K = $2.2\times10^{-5} m/s$) ;

- la zone 13 : l'aquifère est constitué de sable moyen à grossier, les valeurs de K sont comprises entre 1.4×10^{-3} et $1.9\times10^{-3} m/s$, il est localisé dans de dépôts de cordons littoraux ;

- les zones 14 et 15 sont situées non loin de la rivière Rusizi et du lac Tanganyika. La nature lithologique de ces deux zones est presque la même que la zone 13. Il s'agit d'un sable fin à grossier ayant des perméabilités comprises entre 9.7×10^{-4} et $3.0\times10^{-3} m/s$ dans la zone 14, entre 3.4×10^{-3} et $8.3\times10^{-3} m/s$ dans la zone 15 ;

- la zone 16 est située dans les dépôts fluviatiles du Sud-Est ; l'aquifère est constitué d'un sable graveleux, les valeurs de K sont comprises entre 1.1×10^{-3} et 9.1×10^{-3} m/s, à l'exception du forage Ru 153 qui présente une valeur de K ($1.4\times10^{-4} m/s$) beaucoup plus faible.

La délimitation des zones présentant des conductivités hydrauliques proches n'est pas aisée, surtout dans une plaine à dépôts fluvio-lacustres comme la plaine de la Rusizi. Alors que certaines zones présentent une même lithologie, nous avons observé que les conductivités hydrauliques sont assez différentes : c'est le cas par exemple des zones 10 et 11 où la zone 10 affiche des valeurs de K plus élevées.

Comme l'on peut observer sur la figure.VI.13, les secteurs les plus perméables de la basse Rusizi sont ceux situés dans les dépôts fluviatiles du Nord-Est (zones 6, 8, 9, et 10) et du Sud-Est (zone 16) ainsi que ceux de dépôts de cordons littoraux situés non loin du lac Tanganyika (zones 13, 14 et 15).

VI .3.2. Transmissivités

Les transmissivités ont été déterminées avec la formule :

$$T = Ke \quad [m^2/s]$$

Dans les forages où l'épaisseur de l'aquifère n'est pas connue , T a été calculée à partir des débits spécifiques ($\frac{Q}{\Delta}$) calculées à 4 m³/h (Waleffe, 1985). La formule utilisée est la suivante :

$$T = \frac{Q}{2{,}73\Delta}\log\frac{R}{r} = \frac{q_\Delta}{2{,}73}\log\frac{R}{r}$$

Il s'agit de la zone 17 située dans les dépôts fluviatiles de l'Est, qui a été explorée par les forages Ru 83, 171, 176, 178, 179 et 180), de la zone 18 localisée dans les dépôts lacustres (Ru 181, 182, 184, 184, 185, 186 et 187) ainsi que la zone 19, située entre la petite et la grande Rusizi.

La conductivité hydraulique et l'épaisseur variables de la nappe donnent des valeurs de transmissivité qui varient dans de larges limites. Les tableaux 6.3 et 6.4 reprennent les transmissivités et les débits spécifiques calculés respectivement dans les parties congolaise et burundaise de la plaine.

Forage	e	Q	Δ	q_Δ	T		Forage	e	Q	Δ	q_Δ	T
	(m)	m³/h	(m)	m³/h.m	(m²/s)			(m)	m³/h	(m)	m³/h.m	(m²/s)
1												
Ki 43	11.00	2	2.1	0.95	3.2E-04		Ki 192	5.50	2.4	0.8	3.00	1.0E-03
Ki 51	3.00	0.5	2.81	0.18	6.0E-05		Ki 39	3.00	2	0.9	2.22	7.5E-04
Ki 41	2.50	0.5	1.5	0.33	1.1E-04		Ki 199	3.60	2	1.25	1.60	5.4E-04
2							KI 221	5.50	2.4	0.6	4.00	1.3E-03
Ki 37	4.50	2	0	?	?		Ki 222	3.50	2.4	0.7	3.43	1.2E-03
KI 225	3.50	2	0.6	3.33	1.1E-03		Ki 52-1	8.50	1.8	0.23	7.83	2.6E-03
Ki 197	3.50	2.4	0.9	2.67	9.0E-04		3					
Ki 38	14.50	2	0.3	6.67	2.2E-03		Ki 223	4.50	2.4	0.25		3.2E-03

Tableau 6.3 : Transmissivités (T) de la partie congolaise.

Forage	e (m)	Q m³/h	Δ (m)	q_Δ	T (m²/s)	Forage	e (m)	Q m³/h	Δ (m)	q_Δ	T (m²/s)
4						**11**					
Ru 161	4.45	4	1.13	3.54	1.2E-03	**Ru 133**	5.00	4	0.85	4.71	1.6E-03
Ru 159	18.65	4	1.65	2.42	8.1E-04	**Ru 127**	9.00	4	1.21	3.31	1.1E-03
Ru 158	4.00	4	0.10	40.00	1.3E-02	**Ru 151**	16.35	4	0.49	8.16	2.7E-03
Ru 157	7.93	4	1.30	3.08	1.0E-03	**Ru 154**	9.15	4	0.73	5.48	1.8E-03
Ru 123	5.20	4	0.18	22.22	7.5E-03	**Ru 116**	2.70	4	3.96	1.01	3.4E-04
5						**Ru 118**	4.20	2	0.75	2.67	9.0E-04
Ru 139	17.64	4	2.97	1.35	4.5E-04	**Ru 113**	7.10	4	0.59	6.78	2.3E-03
Ru 137	4.70	4	1.46	2.74	9.2E-04	**Ru 109**	9.50	4	6.94	0.58	1.9E-04
Ru 138	10.00	4	0.76	5.26	1.8E-03	**Ru 110**	6.94	4	0.57	7.02	2.4E-03
Ru 131	2.00	4	4.15	0.96	3.2E-04	**Ru 82**	?	4	1.5	2.67	9.0E-04
Ru 135	10.34	4	1.15	3.48	1.2E-03	**Ru 108**	?	4	1.41	2.84	9.5E-04
6						**Ru 140**	1.00	4	0.66	6.06	2.0E-03
Ru 150	2.00	4	0.35	11.43	3.8E-03	**12**					
Ru 162	1.75	4	0.26	15.38	5.2E-03	**Ru 107**	7.00	4	0.34	11.76	4.0E-03
Ru 148	2.00	4	0.07	57.14	1.9E-02	**Ru 102**	3.53	4	0.53	7.55	2.5E-03
Ru 143	5.87	4	0.07	57.14	1.9E-02	**Ru 103**	2.30	4	0.99	4.04	1.4E-03
Ru 155	4.00	4	0.28	14.29	4.8E-03	**Ru 238**	22.00	24	16.75	1.43	4.8E-04
Ru 119	3.10	4	0.5	8.00	2.7E-03	**13**					
Ru 136	5.68	4	0		?	**Ru 115**	4.44	4	0.22	18.18	6.1E-03
Ru 141	6.00	4	0.22	18.18	6.1E-03	**Ru 106**	4.4	4	0		?
Ru 121/1	9.00	4	6.85	0.58	2.0E-04	**Ru 105**	2.60	4	0.27	14.81	5.0E-03
Ru 130	2.70	4	0.6	6.67	2.2E-03	**14**					
7						**Ru 104**	3.00	4	0.46	8.70	2.9E-03
Ru163	7.00	4	0.28	14.29	4.8E-03	**Ru 168**	5.70	4	0.24	16.67	5.6E-03
Ru 160	3.50	4	3.4	1.18	4.0E-04	**Ru 174**	5.00	4	0.09	44.44	1.5E-02
Ru 156	4.00	4	1.95	2.05	6.9E-04	**Ru 169**	14.33	4	0.09	44.44	1.5E-02
8						**Ru 177**	5.70	4	0.18	22.22	7.5E-03
Ru 164	2.50	4	0.08	50.00	1.7E-02	**15**					
Ru 165	1.90	4	0.22	18.18	6.1E-03	**Ru 166**	1.80	4	0.09	44.44	1.5E-02
Ru 142	2.00	4	0.11	36.36	1.2E-02	**Ru 172**	3.00	4	0.07	57.14	1.9E-02
9						**Ru 173**	3.00	4	0.06	66.67	2.2E-02
Ru 134	1.70	4	0.04	100.00	3.4E-02	**Ru 175**	10.00	4	0.04	100.00	3.4E-02
Ru 132	4.5	4	0		?	**16**					
Ru 122	0.52	4	0		?	**Ru 152**	0.50	4	2	2.00	6.7E-04
Ru 125	0.40	4	0.15	26.67	9.0E-03	**Ru 147-1**	2.00	4	0.54	7.41	2.5E-03
10						**Ru 147-2**	10.00	4	0.04	100.00	3.4E-02
Ru 126	1.00	4	1.4	2.86	9.6E-04	**Ru 167-1**	5.80	4	0.04	100.00	3.4E-02
Ru 129	1.45	4	0.15	26.67	9.0E-03	**Ru 167-2**	0.75	4	0.45	8.89	3.0E-03
Ru 146	4.32	4	0.09	44.44	1.5E-02	**Ru 170-1**	3.00	4	0.22	18.18	6.1E-03
Ru 149	6.65	4	0.03	133.33	4.5E-02	**RU 170-2**	3.70	4	0.04	100.00	3.4E-02
Ru 128	4.00	4	0.1	40.00	1.3E-02	**Ru 170-3**	3.00	4	0.42	9.52	3.2E-03
Ru 117	4	4	0			**Ru 170-4**	1.00	4	0.21	19.05	6.4E-03
						Ru 153	3.00	4	3.18	1.26	4.2E-04

Tableau 6.4 a : Transmissivités (T) dans la partie burundaise.

Forage	e	Q	rab		T		Forage	e	Q	rab		T
	(m)	m³/h			(m²/s)			(m)	m³/h			(m²/s)
17							19					
Ru 178	?	4	0.32	12.50	4.2E-03		Ru 191	?	4	0		
Ru 176	?	4	0.27	14.81	5.0E-03		Ru 196	?	4	0		
Ru 171	?	4	0.32	12.50	4.2E-03		Ru 195	?	4	0		
Ru 180	?	4	0.16	25.00	8.4E-03		Ru 193	?	4	0		
Ru 179	?	4	0.09	44.44	1.5E-02		Ru 194	?		0		
Ru 83	?	4	0.46	8.70	2.9E-03		Ru 190	?	4	0.06	66.60	2.2E-02
18							Ru 100	?	4	0		
Ru 182	?	4	0.52	7.69	2.6E-03		Ru 192	?	4	0.81	4.97	1.7E-03
Ru 181	?	4	1.49	2.68	9.0E-04		Ru 99	?	4	0		
Ru 187	?	4	0.29	13.79	4.6E-03		Ru 189	?	5	0		
Ru 185	?	4	0.12	33.33	1.1E-02		Ru 200	?	15	2.85	5.26	1.8E-03
Ru 186	?	4	0.16	25.00	8.4E-03		Ru 198	?	24	0.92	26.03	8.7E-03
Ru 188	?	4	0.29	13.79	4.6E-03							
Ru 184	?	4	1.34	2.99	1.0E-03							
Ru 183	?	4	0.76	5.26	1.8E-03							

Tableau 6.4 b : Transmissivités (T) dans la partie burundaise (zones où l'épaisseur de la nappe n'est pas connue)

La fig. VI.14 reprend la répartition spatiale des transmissivités de la plaine.

Dans la partie congolaise de la plaine, les transmissivités varient entre 6.0×10^{-5} et $3.2\times10^{-3} m^2/s$, ces deux valeurs extrêmes étant calculées respectivement aux forages Ki 51 et Ki 223. Deux zones sont mises en évidence :

- la zone 1, située à l'extrémité occidentale, à la limite entre la plaine et les contreforts de la plaine, présente des transmissivités comprises entre 6.0×10^{-5} et 3.2×10^{-4} m²/s ;

- la zone 2, située sur la rive droite de la Rusizi, les transmissivités sont comprises entre 5.4×10^{-4} et 2.6×10^{-3} m²/s ;

- le forage Ki 223 de la zone 3 présente une transmissivité égale à $3.2\times10^{-3} m^2/s$, c'est la plus élevée de toute la partie congolaise de la plaine.

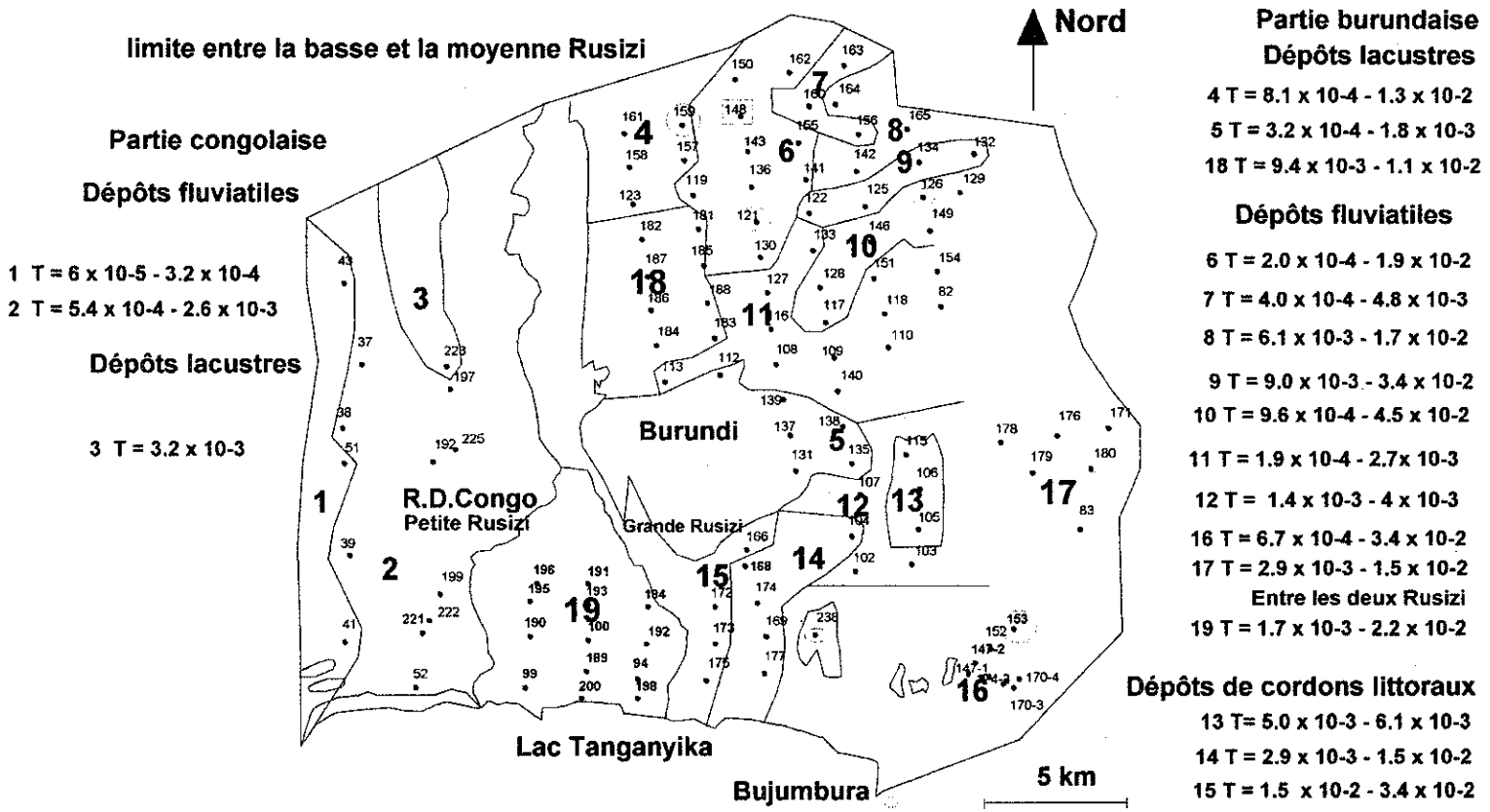


Fig. VI.14 : Répartition spatiale des transmissivités T (m^2/s)

Dans la partie burundaise, les transmissivités sont comprises entre 1.9×10^{-4} et 4.5×10^{-2} m²/s ; ces deux valeurs sont respectivement calculées au forage Ru 109 et Ru 149.

Les dépôts lacustres (zones 4, 5 et 18) présentent des transmissivités comprises 3.2×10^{-4} et 1.3×10^{-2} m²/s :

- la zone 4 : T = $8.1\times10^{-4} - 1.3\times10^{-2}$ m²/s ;
- la zone 5 : T = $3.2\times10^{-4} - 1.8\times10^{-3}$ m²/s ;
- la zone 18 : T = $9.4\times10^{3} - 1.1\times10^{-2}$ m²/s ;

Dans ces dépôts lacustres, on observe que la zone 18 est la plus transmissive, avec des valeurs de T supérieures à 2×10^{-3} m²/s dans la majorité de forages, la moins transmissive étant la zone 5 où aucune valeur de T n'atteint 2×10^{-3} m²/s (tableau 6.4,a).

Dans les dépôts fluviatiles, les transmissivités sont comprises entre 1.9×10^{-4} et $4{,}5\times10^{-2}$ m²/s. Au Nord, les zones 6, 7, 8, 9 10 et 11 présentent les valeurs suivantes :

- zone 6 : T = 2.0×10^{-4} à 1.9×10^{-2} m²/s ;
- zone 7 : T = 4.0×10^{-4} à 4.8×10^{-3} m²/s ;
- zone 8 : T = 6.11×10^{-3} à 1.7×10^{-2} m²/s
- zone 9 : T = 9.0×10^{-3} à 3.4×10^{-2} m²/s ;
- zone 10 : T = 9.6×10^{-4} à 4.5×10^{-2} m²/s ;
- zone 11 : T = 1.9×10^{-4} à 2.7×10^{-3} m²/s.

Les zones 8, 9 et 10 sont les plus transmissives, avec des valeurs de T supérieures à 5×10^{-3} m²/s dans la majorité des forages. Les moins transmissives sont les zones 7 et 11, avec des valeurs de T inférieures à 2×10^{-3} m²/s sont les plus fréquentes.

Dans la partie centrale, la zone 12 affiche des valeurs de T comprises entre 1.4×10^{-3} et 4×10^{-3} m²/s.

Les dépôts fluviatiles du Sud-Est (zone 16) présentent des valeurs de T très variables malgré la proximité entre les forages, elles varient entre 4.2×10^{-4} et 3.4×10^{-2} m²/s et seuls cinq forages affichent des valeurs de T supérieures à 6×10^{-3} m²/s.

Dans les dépôts fluviatiles de l'Est (zone 17), les valeurs de T sont comprises entre 2.9×10^{-3} et 1.5×10^{-2} m²/s, seuls les forages Ru 179 et 180 affichent des valeurs de T supérieures à 5×10^{-3} m²/s.
Au Sud, les zones 13,14 et 15 localisées dans les dépôts de cordons littoraux présentent les transmissivités suivantes :

- zone 13 : T = 5.0×10^{-3} - 6.1×10^{-3} m²/s ;
- zone 14 : T = 2.9×10^{-3} – 1.5×10^{-2} m²/s ;
- zone 15 : T = 1.5×10^{-2} – 3.4×10^{-2} m²/s ;

A l'exception du forage Ru 104, les zones14 et 15 présentent des valeurs de transmissivité élevées (T > 5×10^{-3} m²/s), tous les forages de la zone 15 affichent des valeurs de T supérieures à 1×10^{-2} m²/s.

Entre la petite et la grande Rusizi (zone 19), seuls les forages Ru 192,190, 198, 199 et 200 ont enregistré des rabattements, les transmissivités calculées dans cette zone sont comprises entre 1.7×10^{-3} et 2.2×10^{-2} m²/s. Dans les forages Ru 198 et 200 localisés tout près du lac Tanganyika, le pompage a été réalisé respectivement à 24 et 15 m³/h. Les transmissivités calculées dans ces deux forages sont respectivement égales à 8.7×10^{-3} et 1.8×10^{-3} m²/s

VI.4 Conclusion

L'étude hydrodynamique vient de mettre en exergue les grandes lignes de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques. On est en présence d'un aquifère hétérogène, comme en témoignent les variations fréquentes des conductivités hydrauliques et des transmissivités.

Les potentialités aquifères de la plaine dans la partie congolaise sont faibles : à l'exception du seul forage Ki 223 implanté dans les dépôts lacustres, qui présente une valeur de K égale à 7.2×10^{-4} m/s et T égale à 3.2×10^{-3} m²/s, les conductivités hydrauliques calculées dans les autres forages sont toutes inférieures à 4×10^{-4} m/s et les transmissivités ne dépassent pas 3×10^{-3} m²/s.

Dans la partie burundaise, la répartition spatiale des conductivités met en évidence des zones très perméables : les dépôts fluviatiles du Nord-Est (zones 6, 8, 9 et 10) et du Sud-Est (zone 16) et les cordons littoraux aux abords du lac Tanganyika (zones 13, 14 et 15). Dans ces zones, la majorité des forages présentent des valeurs de K supérieures à 1×10^{-3} m/s. Ce sont ces mêmes zones qui sont les plus transmissives, avec des valeurs de T qui sont supérieures à 6×10^{-3} m²/s dans la plupart de forages.

Les dépôts lacustres sont moins perméables et moins transmissifs que les dépôts fluviatiles. La partie Nord (zone 4) est plus perméable et transmissive que la partie centrale (zone 5). Des 18 forages implantés dans ces dépôts, seuls les forages Ru 158, 123, 185 et 186 présentent des valeurs de T supérieures à 5×10^{-3} m²/s.

VII. Traitement géostatistique des conductivités hydrauliques de la basse Rusizi

VII.1. Introduction

Les propriétés physiques et hydrodynamiques d'un milieu poreux varient beaucoup dans l'espace. Même à l'intérieur d'une couche géologique continue, les différentes propriétés présentent une variation selon l'endroit de leur observation, et la dimension de l'échantillon physique sur lequel est réalisé cette mesure. L'importance de cette variation dépend de plusieurs phénomènes attribuables à différentes causes dont la principale est l'hétérogénéité du milieu.

Dans notre travail, un traitement géostatistique a été réalisé par krigeage des conductivités hydrauliques de l'aquifère de la partie burundaise de la plaine.

Les objectifs poursuivis sont :

- trouver une estimation optimale du champ des conductivités hydrauliques (K) de l'aquifère à partir des données ponctuelles disponibles ;

- trouver une estimation optimale des valeurs moyennes de K dans les différents secteurs de la plaine ;

- optimiser l'emplacement de nouveaux points de mesure, pour minimiser l'incertitude sur un champ de conductivités hydrauliques.

Le théorie sur le krigeage, présentée brièvement ci-dessous, est tirée des notes de G. de Marsily (Géostatistique en hydrologie, 1992) et de la thèse de A. Dassargues (1992).

VII.2. Approche géostatistique de la variabilité spatiale

L'approche géostatistique suppose que le milieu poreux est une réalisation d'un phénomène aléatoire. C'est-à-dire que la configuration, l'arrangement, ou les propriétés du milieu poreux vont varier d'une réalisation à l'autre. L'outil approprié pour étudier ces variations est le langage probabiliste, qui permet d'étudier la loi de distribution de la propriété, sur l'ensemble infini des réalisations.

A partir d'un certain nombre de données ponctuelles, on pourra estimer sur tout le domaine à étudier la valeur d'une variable (K, T,...) et d'en mesurer l'incertitude.

Si l'on connaît la loi de distribution d'une propriété donnée, on peut calculer, en tous points, ses paramètres statistiques:

- les paramètres de position ou de tendance centrale (moyennes, médiane, mode) qui caractérisent l'ordre de grandeur des valeurs de la variable aléatoire ;

- les paramètres de dispersion (variance, écart type, coefficient de variation, etc.) qui quantifient la variabilité des valeurs autour d'un paramètre de position ;

- les paramètres de dissymétrie et d'aplatissement qui caractérisent la répartition de ces valeurs autour de cette position.

La connaissance des principaux paramètres statistiques permet de caractériser la loi de probabilité d'une propriété. Dans la pratique, on ne dispose que d'une seule réalisation du phénomène aléatoire « milieu poreux ». Pour pouvoir utiliser les notions probabilistes, on leur adjoint quelques hypothèses qui caractérisent ce milieu .

VII.2.1. Hypothèse de stationnarité

Soit Z(x) le paramètre étudié dont on connaît les valeurs $Z_i = Z(x_i)$ en n endroits (avec x pouvant représenter 1,2 ou 3 coordonnées et i = 1, 2 ....., n). Le paramètre Z (x) résulte de la réalisation d'une fonction aléatoire Z(x,ξ), où ξ est une variable d'état dans l'espace des réalisations.

L'hypothèse de stationnarité suppose que la loi de probabilité de la propriété étudiée, sur l'ensemble des réalisations, est stationnaire dans l'espace. C'est-à-dire qu'elle est la même en tous points de l'espace et ne dépend pas de la position des points mais de la distance qui les sépare.

L'hypothèse de stationnarité implique que :

- les valeurs de Z sont totalement indépendantes de x et l'espérance mathématique est constante et égale à une valeur moyenne :

  $\forall x$, $E[Z(x,\xi)] = m$ (stationnarité du 1er moment, Z est stationnaire du 1er ordre) ;

- la covariance C(d) ne dépend que de la distance d entre les points et non de la position des points. Elle s'exprime par :

$$C(d) = E[(Z(x+d)-m)(Z(x)-m)] \qquad \text{(VII.1)}$$

- si la distance (d) est nulle, l'équation (VII.1) s'écrit :

$\forall x$, $E[(Z(x,\xi) - m)^2] = \sigma^2$ = variance constante (stationnarité du 2ème moment, Z est stationnaire du 2ème ordre)

La fonction de covariance C(d) détermine la structure spatiale du phénomène. Elle décroît en fonction de la distance et tend vers zéro quand la distance qui sépare deux points tend vers l'infini (fig.VII.1) et que la corrélation entre ces deux points devient de plus en plus négligeable.

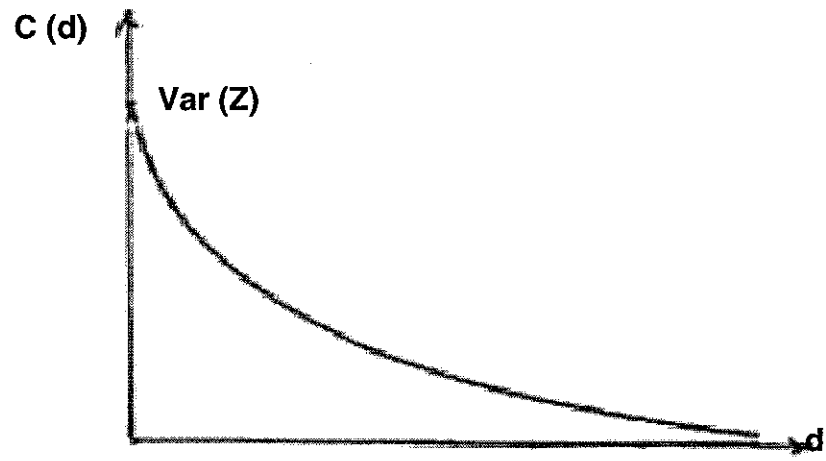


Fig. VII.1 : Variation de la covariance en fonction de la distance d.

VII.2.2. Hypothèse d'ergodicité

L'hypothèse d'ergodicité suppose que la réalisation unique étudiée (milieu poreux) déploie dans l'espace la loi de distribution stationnaire invoquée. A partir de l'observation de la variation dans l'espace géométrique de la propriété, sur la réalisation unique, on en déduit la loi de distribution de la propriété. Dans ce cas, les moyennes spatiales peuvent être utilisées pour estimer des moyennes dans l'ensemble des réalisations.

Un milieu où se vérifient les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité est dit homogène (au sens statistique).

VII.2.3. Hypothèse intrinsèque.

Souvent, l'hypothèse de stationnarité du 2ème ordre ne peut être vérifiée, la variance varie au fur et à mesure qu'augmentent le nombre de mesures d'une propriété donnée et la taille de la zone reconnue.

G. Matheron (1971) a proposé l'hypothèse intrinsèque, qui rend plus facile la détermination du type de fonction de corrélation qui existe dans l'espace pour le paramètre étudié. Elle consiste à dire que même si la variance de Z n'est pas finie, la variance des incréments de Z est finie et ces premiers incréments sont eux-mêmes stationnaires du 2ème ordre.

L'hypothèse implique que :

$$E[Z(x+d)-Z(x)]=m(d) \qquad \text{(VII.2)}$$

$$\text{Var}[Z(x+d)-Z(x)]=2.\gamma(d) \qquad \text{(VII.3)}$$

m(d) et $\gamma(d)$ dépendent de la distance (d) entre les deux points et non de leur position (x).

Le plus souvent, on suppose que m(d) = 0, et les équations (VII.2) et (VII.3) s'écrivent :

$$E[Z(x+d)-Z(d)]=0$$

$$\gamma(d)=\frac{1}{2}\text{var}[Z(x+d)-Z(x)] \qquad \text{(VII.4)}$$

$$\gamma(d)=\frac{1}{2}E[(Z(x+d)-Z(x))^2] \qquad \text{(VII.5)}$$

La fonction $\gamma(d)$ est un semi-variogramme, communément appelé variogramme. Elle représente l'accroissement quadratique de Z entre deux points de mesure distants de d (fig.VII.2).

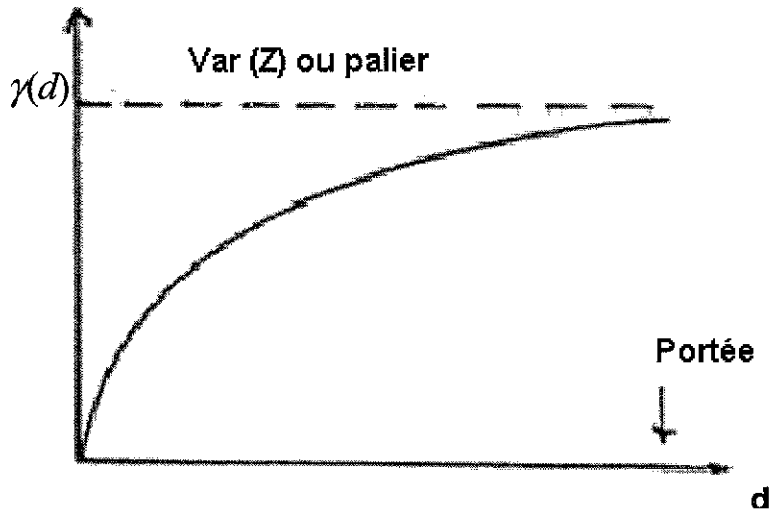


Fig.VII.2 : Variation du variogramme en fonction de la distance d.

Dans le cas de la stationnarité, on peut écrire :

$$\gamma(d) = \frac{1}{2}E\left[(Z(x+d))^2\right] - E[Z(x+d).Z(x)] + \frac{1}{2}E\left[(Z(x))^2\right] \qquad \text{(VII.6)}$$

Pour d = 0, l'équation (VII.1) s'écrit :

C(0) = $E\left[Z(x)^2\right] - m^2$ et l'équation (VII.6) devient :
$\gamma(d) = C(0) - C(d)$

Le variogramme est alors le symétrique de la covariance à une translation près (fig.VII.3)

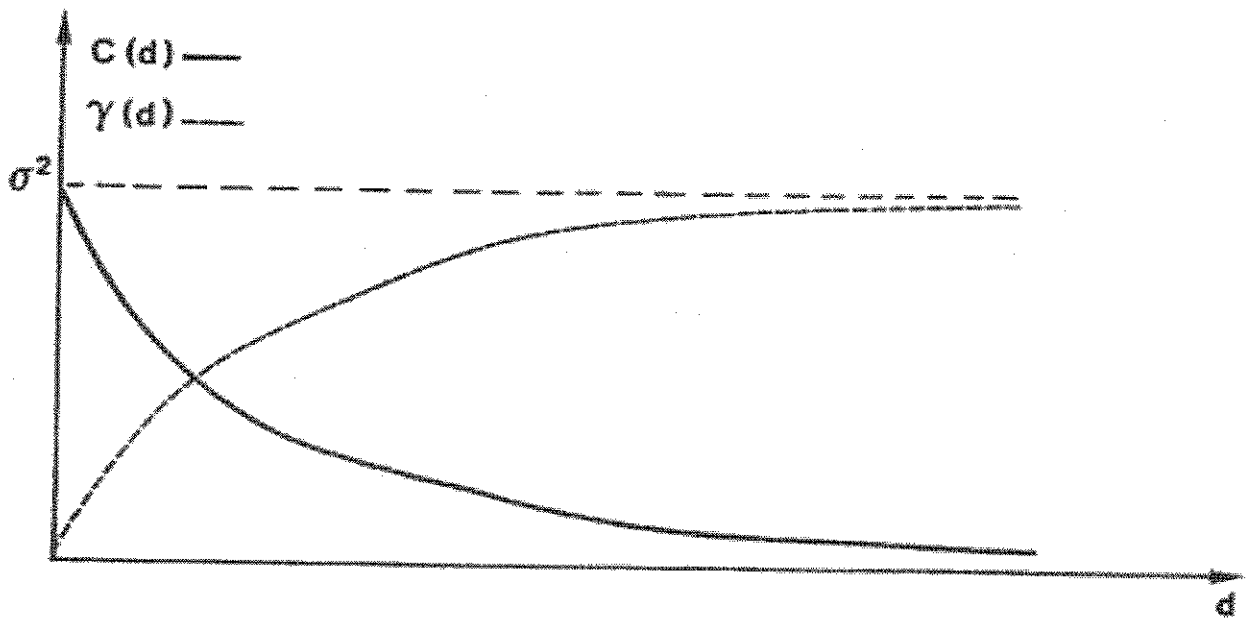


Fig. VII.3: Covariance et Variogramme (hypothèse de stationnarité).

L'analyse du variogramme permet de définir la structure spatiale de la propriété étudiée, par la détermination de trois paramètres principaux, à savoir :

- la portée « range » : une distance caractéristique de la corrélation spatiale de la propriété, elle représente la distance moyenne d'éloignement de deux points au-delà de laquelle les valeurs de la propriété deviennent statistiquement indépendantes ;

- le seuil « sill » : la valeur de $\gamma(d)$ à laquelle le variogramme se stabilise, quand la portée est atteinte;

- comportement à l'origine : théoriquement $\gamma(d) = 0$ pour $d = 0$ quel que soit le variogramme. Souvent, les variogrammes présentent en pratique

une ordonnée à l'origine non nulle (fig.VII.4, a) appelé effet de pépite « nugget effect » dû au comportement erratique de la propriété. Deux points distincts, même très proches l'un de l'autre, montrent une différence de mesure dont la variance est au moins égale à l'effet de pépite.

Pour prendre en compte l'effet de pépite, l'équation du variogramme s'écrit :

$$\gamma(d) = C[1 - \delta(d)] + \gamma'(d) \qquad \text{(VII.7)}$$

avec $\delta(d) =$ symbole de Kronecker (fonction de Dirac)

si $\delta(d) = 1$, si $d \neq 0 \Rightarrow \gamma(d) = \gamma'(d)$

si $\delta(d) = 0$, $\gamma(d) = C + \gamma'(d)$

$\gamma'(d)$ = le variogramme correspondant aux données mais avec C comme origine

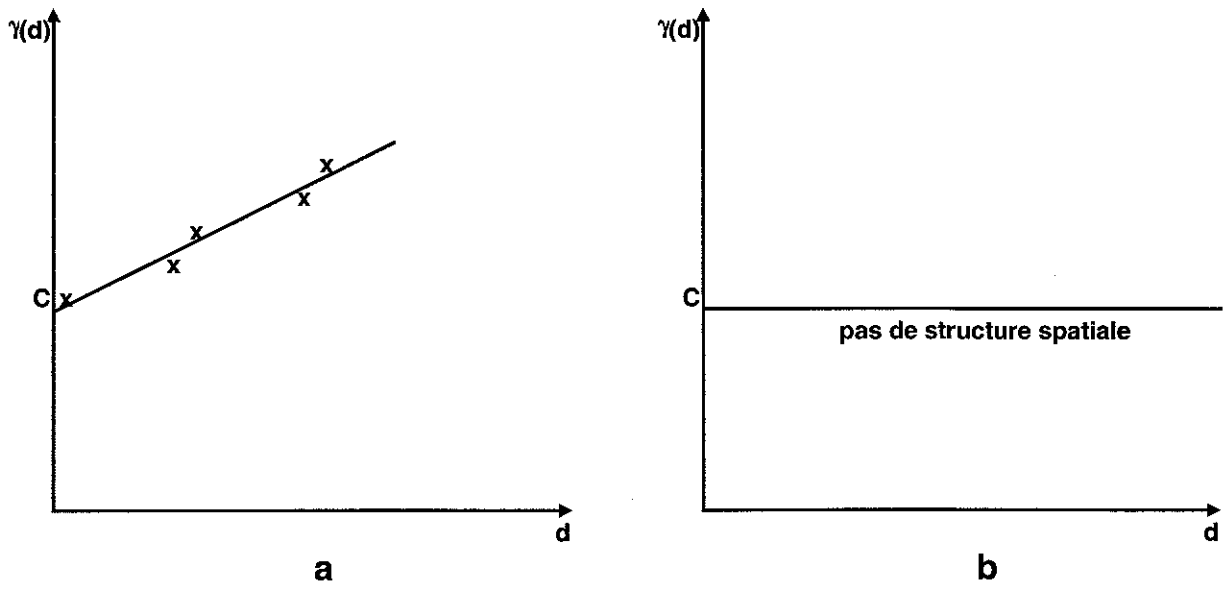


Fig. VII.4 Comportement du variogramme près de l'origine.

Dans le cas où une corrélation spatiale n'existe pas entre les données, on obtient un variogramme horizontal :

$\forall d > 0$, $\gamma(d) = C$, on parle d'effet de pépite pur (fig.VII.4, b).

VII.3. Equations du Krigeage

Soit x_1, x_2,...., x_n, les coordonnées généralisées de n points de mesure et $Z_i = Z(x_i)$ la valeur mesurée au point i, le krigeage permet de déterminer la valeur de Z_0 pour un point quelconque qui n'a pas été mesuré (Fig.VII.5). En calculant la valeur estimée en différents points non mesurés, éventuellement alignés suivant une grille prédéfinie, on estime l'ensemble du champ du paramètre Z.

L'estimateur Z_0^* d'une valeur réelle Z_0 est, par définition du krigeage, une combinaison linéaire des mesures :

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_0^i Z_i \qquad \text{(VII.8)}$$

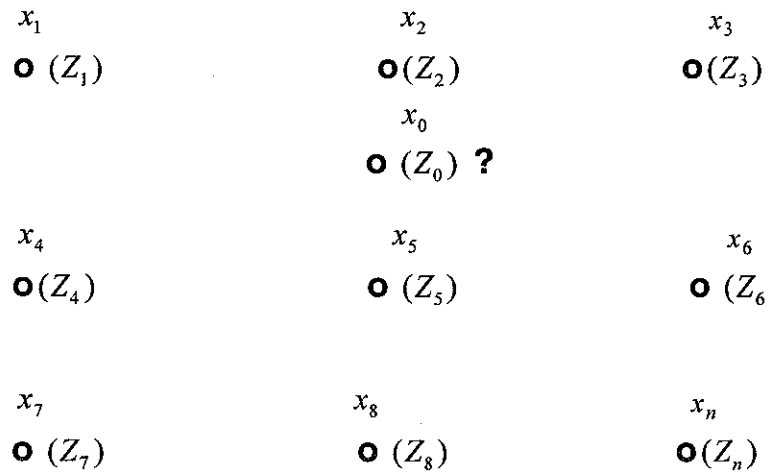


Fig.VII.5 : Mesures Z_i en x_i et point x_0 où une estimation Z_0 est calculée

Z_0*= l'estimateur d'une valeur réelle Z_0 au point x_0 ;

n = le nombre total de mesures, ou, dans certains cas, nombre de mesures situées dans une fenêtre mouvante ;

λ_0^i = le facteur de pondération, qui est l'inconnue du problème, dépendant de l'emplacement du point x_0 et des mesures par

rapport aux autres x_i. A chaque point x_0 où Z_0 est estimé par Z_0 *, il y aura un jeu de λ et l'indice i est relatif à la mesure faite en x_i.

Deux conditions permettent de déterminer ces facteurs de pondération λ_0^i :

a) condition de non-biais

L'espérance mathématique de la valeur estimée doit être égale à l'espérance mathématique de la valeur réelle (estimateur non biaisé). C'est-à-dire que :

$$E(Z_0^* - Z_0) = 0 \qquad E(Z_0^*) = E(Z_0) \tag{VII.9}$$

Si m est la valeur inconnue de cette espérance mathématique

$$E(Z_0^*) = E(Z_0) = E(\sum_{i=1}^{n} \lambda_0^i Z_i) = \sum_{i}^{n} \lambda_0^i . E(Z_i) = m \tag{VII.10}$$

La condition de non biais impose que $\sum_{i}^{n} \lambda_o^i = 1$ (VII.11)

b) condition d'optimalité

L'estimateur Z_0 doit être optimal, c'est-à-dire que la variance de l'erreur d'estimation $E[(Z_0^* - Z_0)^2]$ doit être minimale, tout en respectant la condition de non-biais.

En utilisant un coefficient de Lagrange μ pour faciliter la minimisation de la variance de l'erreur d'estimation et en respectant la définition du variogramme, les deux conditions conduisent aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \sum_{i}^{n} \lambda_o^i = 1 \\ \sum_{j} \lambda_0^i \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0) \end{cases} \tag{VII.12}$$

μ : multiplicateur Lagrange, inconnue supplémentaire ajoutée aux n inconnues λ_0^i.

On obtient un système de n+1 équations à n+1 inconnues dont la matrice est définie positive. Par résolution de ce système, on obtient l'estimateur de la valeur réelle Z_0

Le krigeage est un interpolateur exact : l'estimation effectuée en un point de mesure pourvu d'une mesure expérimentale fournit la valeur mesurée. C'est-à-dire que :

$$Z_k^* = Z_k$$
$$Var(Z_k^* - Z_k) = 0$$

La variance de dispersion des valeurs estimées par krigeage est inférieure à la variance de dispersion des données mesurées, c'est-à-dire que les valeurs estimées seront plus lissées que les valeurs réelles.

Par rapport aux schémas classiques d'estimation (Interprétation manuelle , interpolations polynomiales, méthode des moindres carrés, la méthode de Thiessen), le krigeage présente l'avantage de tenir compte de la structure spatiale par le biais du variogramme.

VII.4. Krigeage des conductivités hydrauliques de la basse Rusizi

Dans notre travail, le traitement géostatistique des conductivités hydrauliques a été appliqué dans la partie burundaise de la plaine où nous disposons de 69 valeurs. La majorité de points de mesure (les forages) sont distants de 2000 m dans la direction Est -Ouest et 1260 m dans la direction Nord-Sud (Fig.VII.6).

Dans le cas des perméabilités (ou transmissivités), plusieurs études ont montré que la loi de probabilité de la distribution des perméabilités (ou transmissivités) dans un aquifère est le plus souvent log normale. Le variogramme montre une meilleure corrélation si l'on utilise le logarithme de K (ou T) au lieu de la valeur naturelle.

Le traitement géostatistique de ces données a été réalisé en utilisant par une série de programmes regroupés dans le logiciel GEOEAS (Geostatical Environmental Assessment Software) (Englud & Sparks, 1988).

VII.4.1. Préparation de données

Sur base des coordonnées des points où les conductivités hydrauliques ont été calculées, un fichier de paires (PCF) est créé. Il contient les limites des coordonnées de points, le nombre total de paires possibles, les distances et les directions relatives entre les différentes paires.

Le nombre de paires que l'on peut former à partir d'un ensemble de n mesures est égal à $\frac{n.(n-1)}{2}$. Dans notre cas, nous avons 69 points de mesure, ce qui correspond à 2346 paires pour lesquelles les distances sont calculées.

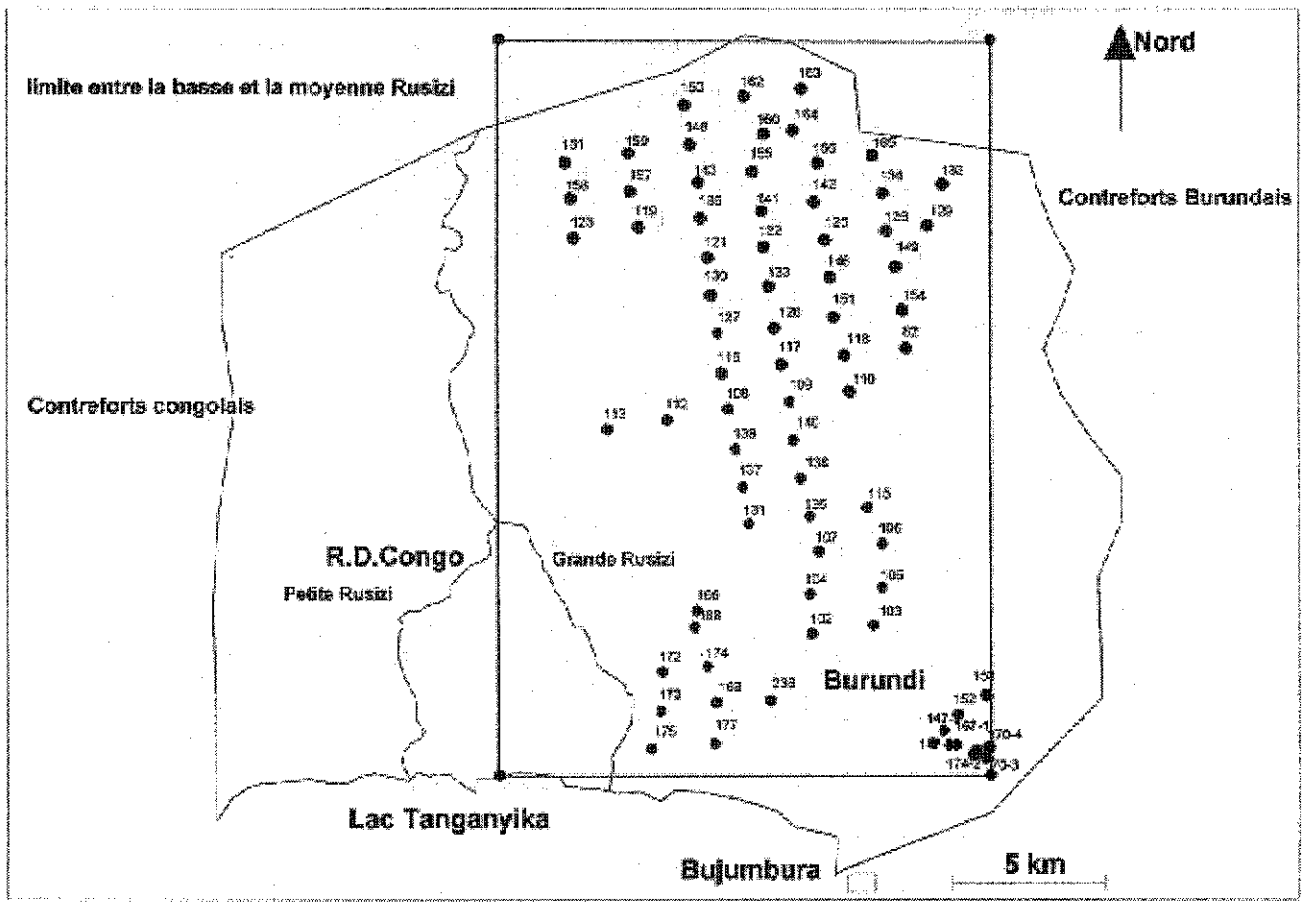


Fig.VII.6 : Basse Rusizi : localisation des points de mesure



VII.4.2 Construction de variogrammes

A partir du fichier de comparaison de paires, un certain nombre de classes de distances entre les points de mesure est défini. Pour chaque classe de distance, le programme calcule automatiquement le nombre de paires de points, leur distance moyenne et la fonction $\gamma(d)$.

En général, il y a plus de couples aux petites distances qu'aux grandes distances, le variogramme devient plus incertain au fur et à mesure que la distance d augmente. Pour obtenir une meilleure structure spatiale des perméabilités, le logiciel permet de transformer les valeurs de K en valeurs logarithmiques.

Une fois le variogramme expérimental construit, il est comparé aux fonctions analytiques dont les expressions sont connues. On ne peut pas utiliser n'importe quel modèle théorique en tant que variogramme, seuls les modèles dont la fonction $\gamma(d)$ est définie positive et croît moins vite que le carré de la distance (d^2) sont utilisés.

Les principales fonctions théoriques utilisées sont reprises au tableau 7.1. L' ajustement de l'une ou l'autre fonction au varigramme expérimental se fait en changeant visuellement les paramètres caractéristiques de la fonction. Dans notre travail, nous avons utilisé les fonctions sphérique et exponentielle.

Fonction	**Formule**
Linéaire / Puissance	$\gamma(h) = w.h^{\lambda}$
Sphérique	$\gamma(h) = w.\left[\frac{3}{2}\frac{h}{a} - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right]$ pour $h \le a$ $\gamma(h) = w$ pour $h > a$
Exponentielle	$\gamma(h) = w\left[1 - \exp(-\frac{h}{a})\right]$
Gaussienne	$\gamma(h) = w.\left[1 - \exp(-\frac{h}{a})^2\right]$

Tableau 7.1 : Fonctions utilisées comme variogramme (d'après Delhomme, 1976, cité par de Marsily, 1992)

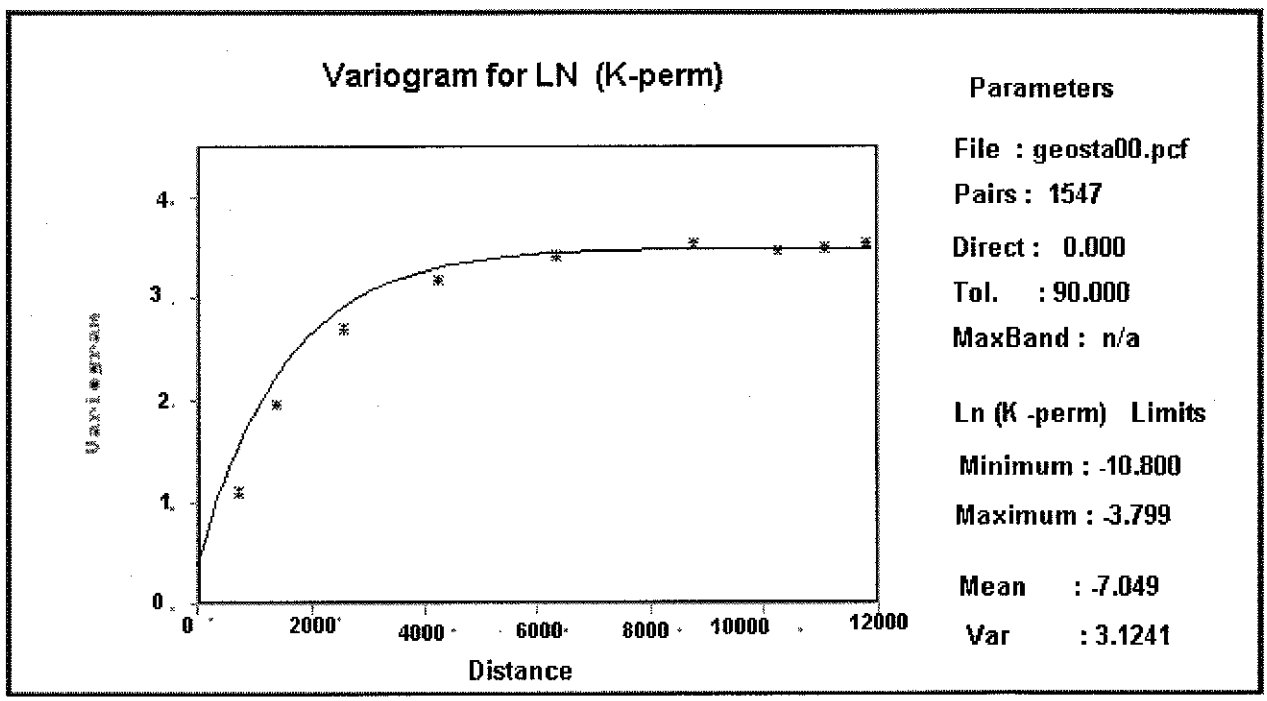
w = valeur du seuil (sauf pour les variogrammes linéaire / puissance) ;
a = valeur de la portée pour le variogramme sphérique ;
3a = valeur da la portée pour le variogramme exponentiel ;
$a\sqrt{3}$ = valeur de la portée pour le variogramme gaussien

Les courbes expérimentales ajustées sur les courbes théoriques (sphérique et exponentielle) sont affichées à la figure VII.7. Les paramètres caractéristiques de ces courbes sont repris au tableau 7.2.

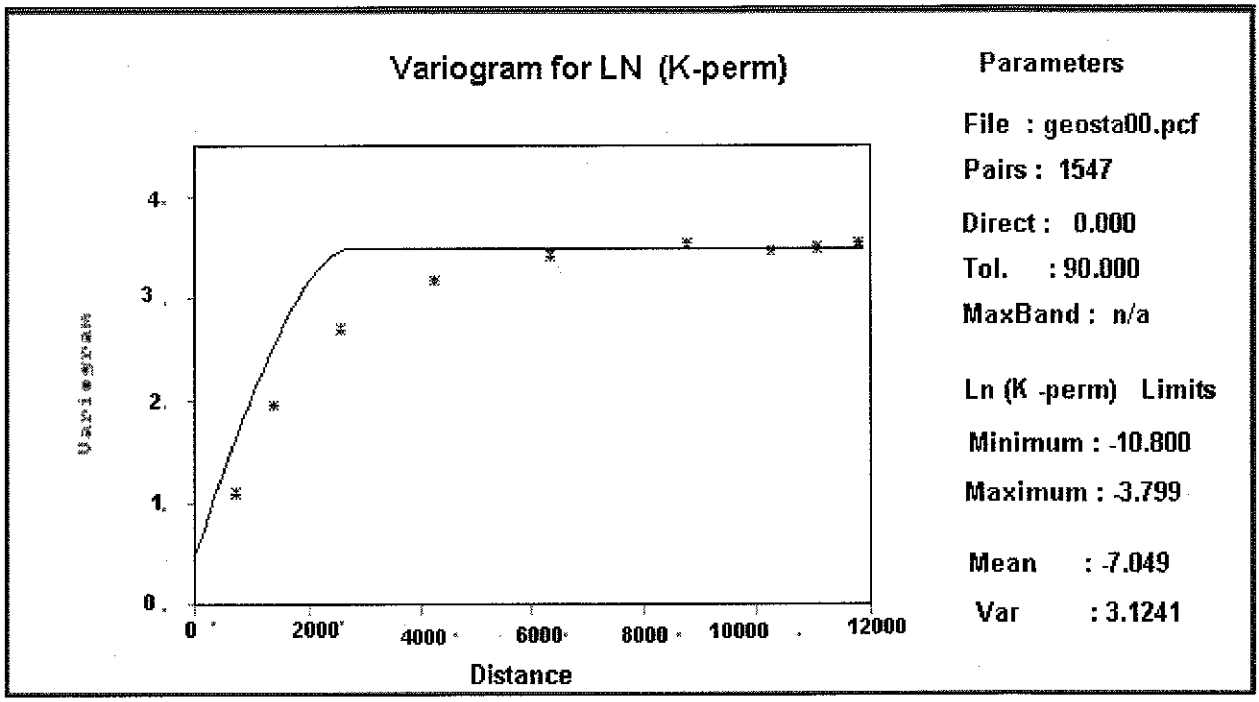
Paramètre		Sphérique	Exponentielle
Effet de pépite		0.4	0
Seuil		2.8	3.5
Portée		2500	5000

Tableau 7.2 : Paramètres caractéristiques des modèles

Des deux fonctions utilisées, laquelle représente au mieux la structure spatiale des perméabilités de la basse Rusizi ? Pour répondre à cette interrogation, les fonctions sont soumises à la validation croisée.



a Modèle exponentiel (obtenu avec 69 valeurs de K)



b. Modèle sphérique (obtenu avec 69 valeurs de K)

Fig.VII.7 : a et b : Courbes obtenues avec 69 mesures de K.

VII.4.3 Validation et choix du modèle

La validation du modèle consiste à réaliser des krigeages successifs en ignorant à chaque fois un des points de mesure (Z_i). Le programme calcule la valeur estimée (Z^*_i) par krigeage au même point en utilisant toutes les autres données. En faisant cette opération pour tous les points de mesure, la valeur estimée à chaque point ignoré indique si une surestimation ou une sous-estimation systématique est commise.

Pour que l'estimateur soit non biaisé, on peut vérifier que l'espérance mathématique de l'erreur d'estimation est égale à zéro :

$$E(Z_i^* - Z_i) \cong 0$$

On réalise également une analyse statistique sur les erreurs d'estimation. On vérifie que :

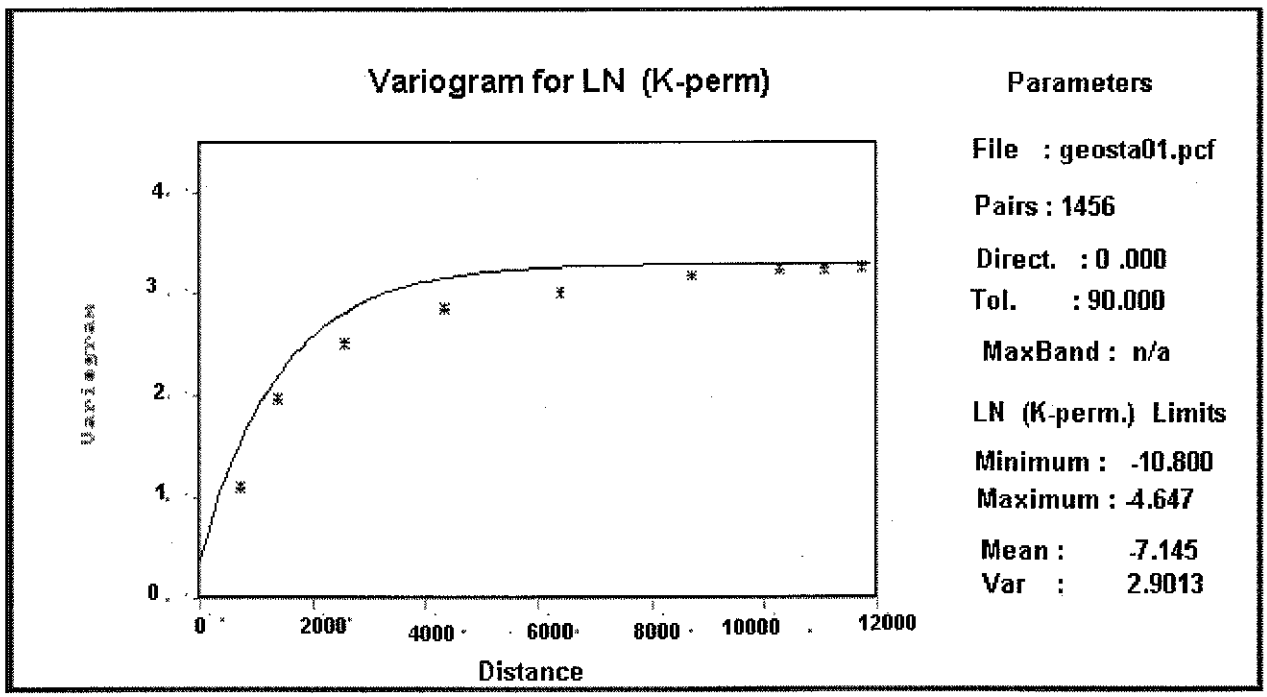
$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{Z_i^* - Z_i}{\sigma}\right]^2 \cong 1$$

La validation des modèles exponentiel et sphérique a donné les résultats qui sont repris au tableau 7.3.

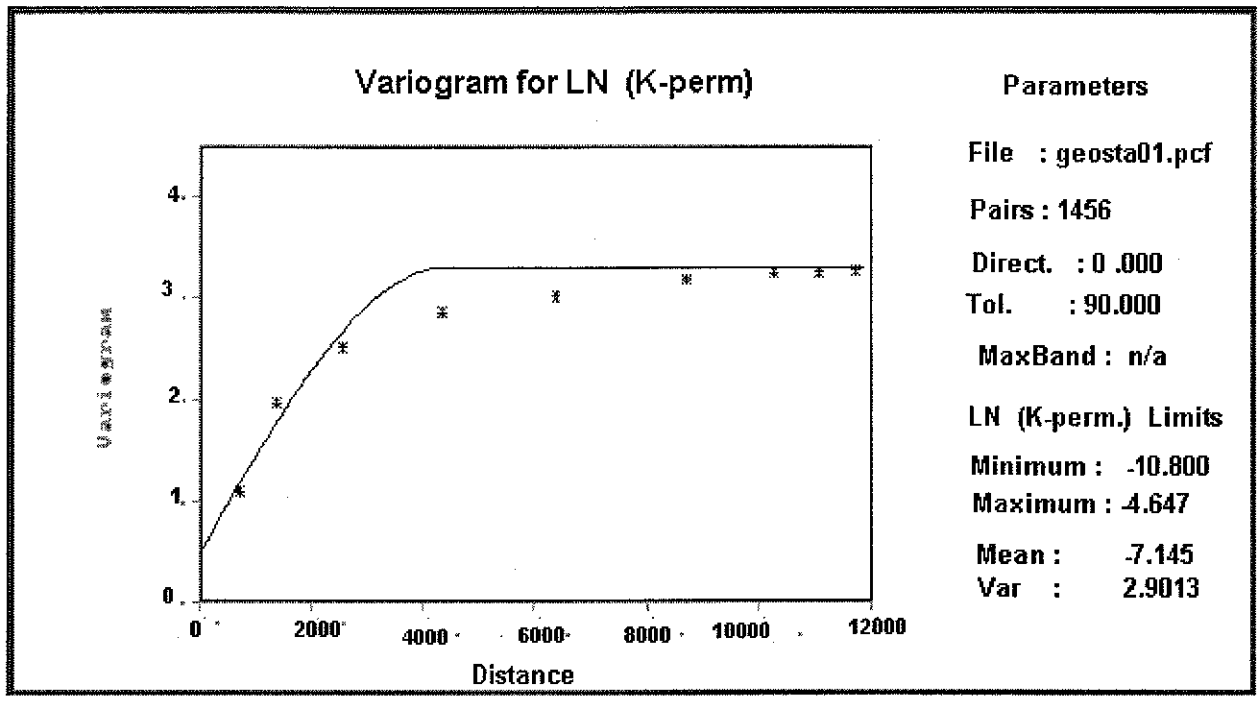
Paramètre		Sphérique	Exponentielle
Effet de pépite		0.5	0.4
Seuil		3	3.1
Rayon		2800	4600
$E(Z_i^* - Z_i)$		0,059	0,018
$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(Z_i^* - Z_i)}{\sigma}\right]^2$		1,010	1,104

Tableau 7.3 : Résultats de la validation croisée (avec 69 valeurs).

En retirant du jeu de données les valeurs très élevées de perméabilité calculées aux forages Ru 134 (K = $1{,}98\times10^{-2} m^2/s$) et Ru 125 (K = $2{,}24\times10^{-2} m^2/s$) et en reconstruisant les variogrammes , on obtient les modèles de la figure VII.8, a et b. Les paramètres utilisés pour construire ces modèles et pour leur validation sont repris au tableau 7.4



a Modèle exponentiel (obtenu avec 67 mesures)



b Modèle sphérique (obtenu avec 67 mesures de K)

Fig.VII.8 : a et b : Modèles obtenus avec 67 mesures de K.

Paramètre	Sphérique	Exponentiel
Effet de pépite	0.5	0.5
Seuil	2.8	2.9
Rayon	4400	4300
$E(Z_i^* - Z_i)$	0,008	0,000
$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(Z_i^* - Z_i)}{\sigma}\right]^2$	1.23	1,014

Tableau 7.4 : Résultats de la validation croisée (avec 67 valeurs).

Des deux fonctions essayées, la fonction exponentielle donne le meilleur résultat avec les caractéristiques suivantes :

Effet de pépite : 0.5
Seuil : 2.9
Rayon : 4300

$$E(Z_i^* - Z_i) = 0.000$$

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(Z_i^* - Z_i)}{\sigma}\right]^2 = 1.014$$

Ce sont ces dernières valeurs qui sont utilisées dans le krigeage des perméabilités de la basse Rusizi.

VII.4.4. Répartition spatiale des conductivités hydrauliques

Le krigeage proprement dit permet de dresser une carte de répartition spatiale des conductivités hydrauliques. Il est réalisé par blocs (block kriging) avec un voisinage mouvant (fig.VII.9), sur une superficie totale de 384 km² . Il s'agit du krigeage ordinaire fournissant des valeurs de ln K par cellule, les dimensions de chaque cellule sont de 250 x 250 m, le nombre total de cellules est égal à 6144. Le nombre de mesures minimum pour l'estimation est choisi à 3, le nombre maximum est égal à 12. Le rayon d'investigation de la fenêtre mouvante est de 4300 m.

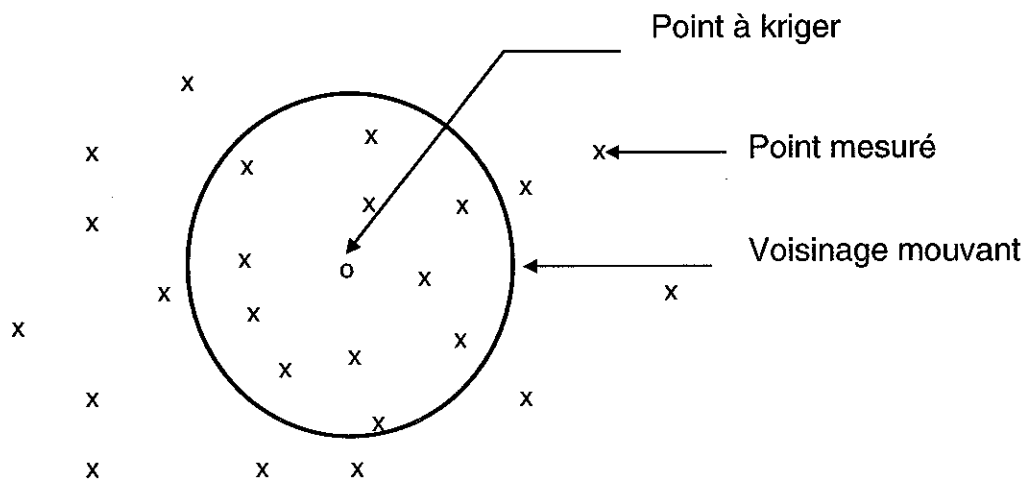


Fig.VII.9 : Krigeage avec un voisinage mouvant.

L'application du krigeage avec un voisinage mouvant présente quelques avantages :

- le variogramme est bien connu pour des petites valeurs de d et devient de moins en moins certain au fur et à mesure que la distance (d) augmente ;

- avec un nombre limité de points voisins, il y a moins d'équations dans le système relatif aux λ_0^i , ce qui facilite le calcul de ces derniers ;

- l'hypothèse de stationnarité est assouplie car appliquée dans chaque fenêtre, on demande que le phénomène Z soit stationnaire dans une zone d'extension limitée, entourant la point estimé.

La figure VII.10 affiche la carte des conductivités hydrauliques obtenue par cette méthode.

Quatre zones sont identifiées sur la carte krigée :

- zone 1 : $K < 1{,}77 \times 10^{-4} m/s$
- zone 2 : $1{,}77 \times 10^{-4} < K < 1{,}04 \times 10^{-3} m/s$
- zone 3 : $1{,}04 \times 10^{-3} < K < 3{,}36 \times 10^{-3} m/s$
- zone 4 : $K > 3{,}36 \times 10^{-3} m/s$

Dans les secteurs où les forages sont éloignés, la carte krigée n'affiche pas de valeurs de ln K.

La carte krigée reflète la forte variabilité des conductivités hydrauliques calculées dans les 69 points de mesure. De façon globale, on peut observer que les secteurs plus perméables (zones 3 et 4) se situent au Nord-Est, au Sud et au Sud-Ouest de la plaine, elles se trouvent dans les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi et dans les cordons littoraux. Dans ces zones, les conductivités hydrauliques krigées sont supérieures à 1,04 x 10^{-3} m/s, certains secteurs présentant des K qui dépassent 3,36 x 10^{-3} m/s.

Dans les dépôts fluvio-lacustres, les conductivités hydrauliques sont inférieures à 1,04 x 10^{-3} m/s , pouvant même descendre en dessous de 1,77 x 10^{-4} m/s dans la partie centrale de la zone étudiée. Dans les zones où les données de K n'existent pas, il n'est pas fourni de valeur krigée.

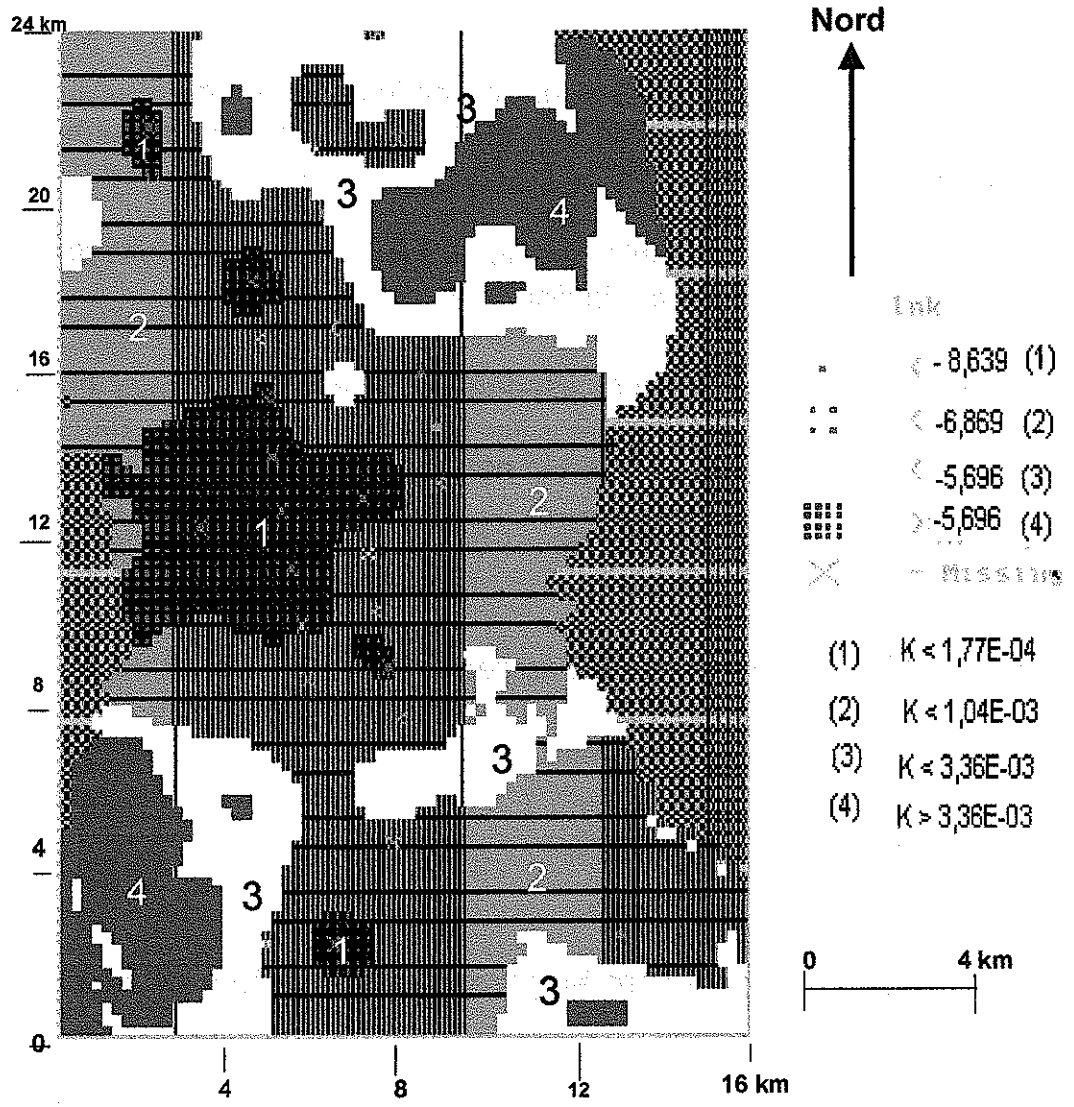


Fig.VII.10 : Carte des conductivités hydrauliques krigées

VII.5. Conclusion

La méthode géostatistique utilisée dans notre travail a permis de déterminer la répartition spatiale des perméabilités de la basse Rusizi à l'aide des variogrammes expérimentaux. Ces variogrammes s'ajustent analytiquement par les fonctions sphérique et exponentielle, la meilleure corrélation étant obtenue avec la fonction exponentielle.

Un effet de pépite égal à 0.4 (en ln K) est mis en évidence ; il traduit les variations de valeurs de K observées même pour des points faiblement distants ; il est lié à l'hétérogénéité des dépôts lacustres et fluviatiles.

La corrélation entre les mesures est présente sur une distance variant entre 4300 m (modèle exponentiel) et 4400 m (modèle sphérique), au-delà de cette distance, les données ne sont plus corrélables.

Nous avons souligné au chapitre VI la forte variabilité des perméabilités de la plaine de la Rusizi qui s'observe même dans les zones présentant la même lithologie. Le krigeage nous permet de mettre en évidence les limites entre les zones présentant des perméabilités différentes.

Les secteurs les plus perméables (zones 3 et 4) sont localisés dans les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi au Nord-Est et au Sud-Est ainsi que dans les dépôts de cordons littoraux (au Sud).

VIII. Modélisation de la nappe de la basse Rusizi

VIII.1. Introduction

En hydrogéologie, les modèles mathématiques sont basés sur la combinaison les lois physiques de Darcy et de conservation de la masse ; elles régissent le mouvement et le stockage de l'eau en milieu poreux. Le milieu poreux est considéré comme un continuum : les propriétés de ce milieu sont considérées comme représentatives d'un certain volume, appelé Elément de Volume Représentatif (E.V.R). A partir de la définition des conditions initiales et des conditions aux limites, on peut déterminer les variations spatiales et temporelles de grandeurs fondamentales (pression d'eau ou hauteur piézométrique) pour l'écoulement, concentration pour le transport de soluté,...) dites variables de champs.

Sur base des résultats obtenus aux chapitres précédents, nous avons élaboré un modèle de la nappe de la basse Rusizi, en utilisant les programmes GMS (ECGL,1998) et MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), disponibles au Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, de Prospection Géophysique et d'Hydrogéologie (LGIH).

La réinterprétation des données géologiques a permis de définir le schéma interprétatif de la structure tridimensionnelle de la plaine : la structure, la configuration, l'extension et les limites de l'aquifère ont été définies (III.3.2.4).

L'infiltration moyenne annuelle vers les nappes de la basse Rusizi a été estimée à partir des bilans hydrologiques du bassin de la Mpanda à l'échelle axe D (V.6.6.3).

L'interprétation des essais de pompage a permis de déterminer localement les paramètres hydrodynamiques de la nappe (VI.3).

Toutes ces données sont introduites dans le modèle qui permettra de mieux comprendre le fonctionnement de la nappe. Une fois mis au point, le modèle constituera un outil prévisionnel à la résolution des problèmes d'exploitation et de gestion de la ressource en eau souterraine. Il permettra entre autre :

- de caractériser du point de vue hydrogéologique des zones mal connues de la nappe ;

- de prévoir l'influence, sur la surface piézométrique, d'une exploitation intensive de la nappe ;
- de déterminer les zones favorables à l'implantation de forages, permettant ainsi de réduire le pourcentage d'ouvrages improductifs ;

- d'évaluer les échanges d'eau entre la nappe et la rivière Rusizi, et entre la nappe et le lac Tanganyika .

VIII.2. Equation généralisée de l'écoulement

La théorie reprise brièvement ci-dessous est empruntée de l'ouvrage « Hydrogéologie quantitative » (G. de Marsily, 1981) et du cours de « Modélisation des réservoirs souterrains » (A.Dassargues, 1995-1996).

VIII.2.1. Loi de Darcy

Dans les milieux poreux, la loi de Darcy relie le flux spécifique du fluide aux causes réelles du déplacement du fluide qui sont le gradient de pression interstitielle et la gravité, elle s'écrit :

$$\underline{v} = -\frac{k}{\mu}\left(\underline{grad}\ p + \rho\ g.\underline{grad}\ z\right) \qquad \text{(VIII.1)}$$

avec :

$\underline{v}$ = flux spécifique du fluide, $[LT^{-1}]$
k = perméabilité intrinsèque du milieu poreux, [L²]
p = pression du fluide, $[ML^{-1}T^{-2}]$
ρ = masse volumique du fluide, $[ML^{-3}]$
g = accélération de la pesanteur, $[L\,T^{-2}]$
z = altitude du point considéré par rapport à un niveau de référence, $[L]$
μ = viscosité dynamique du fluide, $[ML^{-1}T^{-1}]$

Si le fluide est incompressible, l'équation de Bernouilli (en négligeant l'énergie cinétique $\frac{v^2}{2g}$) s'écrit :

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \qquad [L] \qquad \text{(VIII.2)}$$

et donc :

$$\underline{v} = \frac{k\ \rho\ g}{\mu}\ \underline{grad}\ h = -K\ \underline{grad}\ h \qquad \text{(VIII.3)}$$

En milieu non isotrope et pour des fluides incompressibles, la loi de Darcy se généralise aux trois dimensions de l'espace :

$$\underline{v} = -\frac{\underline{\underline{k}}\rho g}{\mu}\underline{grad h} = -\underline{\underline{K}}\,\underline{grad h} \qquad \text{(VIII.4)}$$

$\underline{\underline{K}} = \frac{\underline{\underline{k}}\rho g}{\mu}$ = tenseur des perméabilités du milieu, $[LT^{-1}]$

h = hauteur piézométrique , $[L]$

La vitesse réelle d'écoulement (vitesse effective) s'exprime par :

$$\underline{v_e} = \frac{\underline{v}}{n_e} = \frac{\underline{\underline{K}}}{n_e}\underline{grad\ h} \qquad \text{(VIII.5)}$$

La relation linéaire entre la vitesse de Darcy et le gradient hydraulique a été établie expérimentalement sur des milieux poreux homogènes sablo-argileux à sablo-graveleux, son domaine de validité est testé par le nombre de Reynolds :

$$\mathrm{Re} = \frac{\underline{\underline{v}}\,d\,\rho}{\mu}$$

d = diamètre moyen des grains, ou diamètre efficace d_{10}

On admet généralement que la loi de Darcy est valide si le nombre de Reynolds en milieu poreux est compris entre 1 et 10, auquel cas l'écoulement est purement laminaire à l'intérieur des pores. Le plus souvent, ce domaine de validité exclut les milieux calcaires fracturés et karstifiés (Re >10) et les milieux très argileux (Re < 1)

VIII.2.2. Equation de continuité

L'équation générale de continuité exprimant la conservation de la masse de fluide s'écrit :

$$div(\rho\,\underline{v}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\,n) + \rho\,q = 0 \qquad \text{(VIII.6)}$$

avec q = débit par unité de volume du fluide échangé par l'E.V.R avec l'extérieur (positif si débit sortant) , $[T^{-1}]$;

n = la porosité totale (sans dimension)

$div(\rho\,\underline{v})$ exprime la conservation de la masse d'eau en milieu poreux ;

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\,n)$ représente la variation temporelle de la masse d'eau stockée par unité de volume du milieu poreux.

L'équation résultant de la combinaison des équations VIII.1 et VIII.6 diffère en fonction des hypothèses adoptées pour caractériser le comportement du milieu poreux et de l'eau qu'il contient.

En nappe captive, l'eau et le milieu poreux sont considérés comme compressibles on a :

$$div\frac{k}{\mu}(\underline{grad}\,p+\rho g\,\underline{grad}\,z)-q=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(VIII.7)}$$

ou :

$$div(K.\underline{grad}\,h)-q=S_s.\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(VIII.8)}$$

En régime permanent :

$$div(K.\underline{grad}\,h)-q=0 \qquad \text{(VIII.9)}$$

$$S_s=\rho g(\alpha+n\beta) \qquad [L^{-1}]$$

S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique en milieu poreux saturé, il correspond à la quantité d'eau emmagasinée ou libérée par unité de temps et par unité de volume de milieu poreux saturé, pour une variation unitaire de la hauteur piézométrique.

α = coefficient de compressibilité du milieu poreux $[M^{-1}LT^2]$

β = coefficient de compressibilité du fluide (eau) $[M^{-1}LT^2]$

Pour un fluide incompressible (eau), le coefficient β peut être négligé :

$$S_s=\rho.g.\alpha$$

En intégrant S_s sur l'épaisseur saturée (b) de l'aquifère, on obtient le coefficient d'emmagasinement S :

$$S=\int_{z_1}^{z_2}S_s dz = S_s b \qquad \text{(sans unité)}$$

où z_1 et z_2 sont les cotes de la base et du sommet de l'aquifère
S est le volume de fluide libéré ou stocké par unité de surface de l'aquifère et pour une variation unitaire de la hauteur piézométrique.

Dans le cas d'une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement s'écrit :

$$S = n_e + \int_{z_1}^{h} S_s .dz$$

n_e= porosité efficace de l'aquifère

Le terme $\int_{z_1}^{h} S_s .dz$ traduisant l'emmagasinement par compressibilité du milieu est souvent négligé par rapport à n_e qui peut être assimilée à la porosité de drainage et le coefficient d'emmagasinement S est alors assimilé à cette dernière.

L'équation d'écoulement s'écrit :

$$div\left[\left(\int_{z_1}^{h} Kdz\right).\underline{gradh}\right] - q = n_e.\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(VIII.10)}$$

VIII.2.3.Conditions aux frontières

Une nappe aquifère a une extension limitée dans l'espace. Dans le modèle, on définit quelles sont les conditions à ses frontières, celles-ci peuvent être :

a) une condition de hauteur piézométrique imposée (condition de Dirichlet), qui s'exprime par :

h = f (x, y, z, t)

où f est une fonction connue imposée, elle peut prendre différentes valeurs dans l'espace en fonction du temps.

La valeur h est spécifiée sur la frontière considérée (fig.VIII.1). Dans le cas d'un contact nappe-rivière parfait (implicitement on considère que les perméabilités des berges et du fond de la rivière sont telles qu'aucune différence de niveau d'eau ne peut exister entre la rivière et la nappe), le potentiel imposé est égal à la cote de la surface libre de la rivière .

La condition de Dirichlet peut être également imposée lorsque des lignes équipotentielles peuvent être distinguées (barrages, assèchement de fouille...), ou lorsqu'une zone restreinte comprise dans un aquifère très vaste doit être modélisée, et que les flux aux limites de cette zone sont inconnus, elles doivent être reportées assez loin de la zone de sollicitation afin de ne pas trop influencer la solution.

b) une condition de flux ou de débit imposé (condition de Neumann) ; elle revient à spécifier le débit sur les limites du modèle, indépendamment des hauteurs piézométriques trouvées sur celles-ci. En utilisant la loi de Darcy, c'est le gradient normal à la frontière qui est imposé :

$$K\frac{\partial h}{\partial n}$$

Si la limite correspond à une ligne de courant, aucun flux n'est toléré perpendiculairement, le flux spécifié est nul (conditions de frontière imperméable) :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0$$

Les frontières imperméables peuvent être utilisées lorsque des contrastes supérieurs à 10^{-5} sont constatées dans les valeurs de conductivité hydraulique et à la limite du bassin hydrogéologique de la nappe étudiée.

Si un flux non nul est spécifié, la condition de débit peut s'écrire :

$$\int_S K\frac{\partial h}{\partial n} dS = q(x, y, z, t)$$

avec n : vecteur unitaire normal à la frontière.

La valeur q est spécifiée sur la frontière considérée. L'échange avec l'extérieur est donc totalement imposée.

Les frontières à débit imposé sont généralement distinguées (fig.VIII.2) :

- au sommet du modèle pour tenir compte d'une réalimentation de la nappe par infiltration efficace ;

- au niveau des puits et galerie de pompage (et/ou réinjection), les tranchées drainantes, etc... dont les débits sont connus.

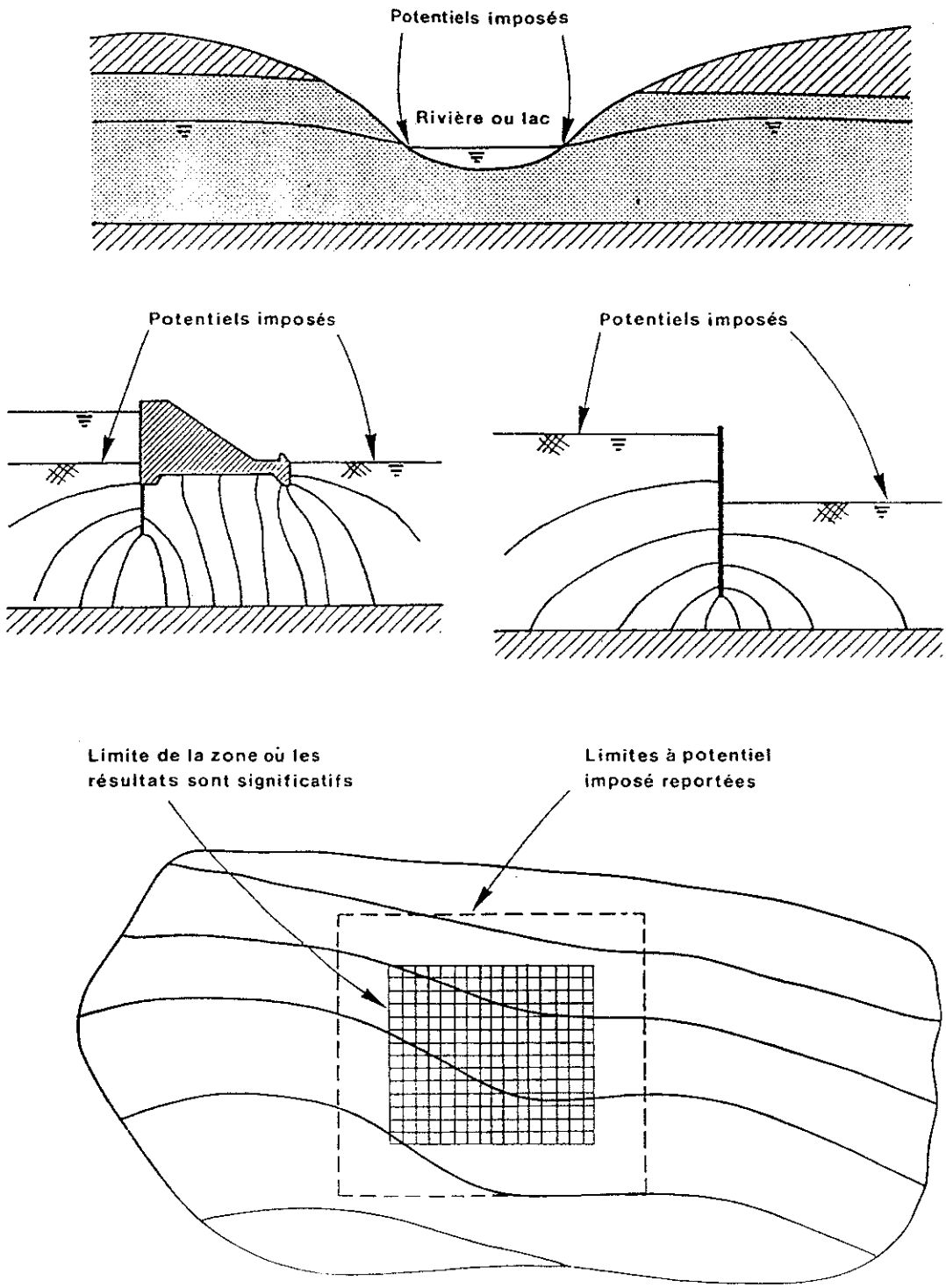


Fig.VIII.1 : Limites à potentiel imposé.

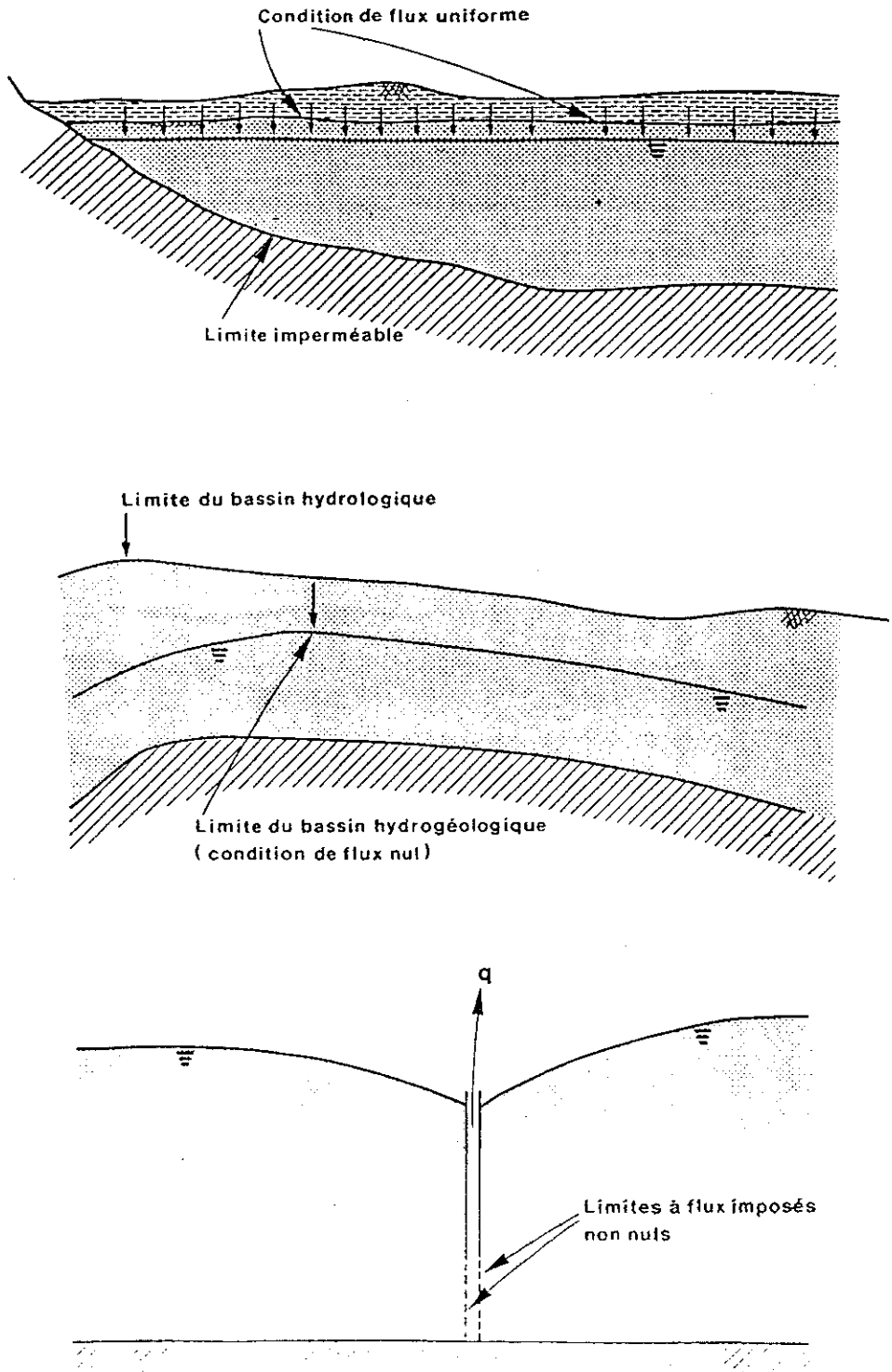


Fig.VIII.2 : Limites à flux imposés.

c) une condition de débit dépendant d'un potentiel (condition de Fourier ou de Cauchy) : c'est une condition mixte exprimée en fonction de $\frac{\partial h}{\partial n}$ et h. L'exemple type est le flux à travers une couche semi-perméable en provenance soit d'un aquifère supérieur (non-simulé), soit d'eaux de surface (fig.VIII.3). La différence des potentiels (h_s-h) induit le flux et par la loi de Darcy, on obtient :

$$q = K' \frac{(h_s - h)}{b'}$$

où K' et b' sont la conductivité hydraulique et l'épaisseur de la couche semi-perméable.

Pour l'aquifère simulé, on obtient :

$$K \frac{\partial h}{\partial n} = K' \frac{(h_s - h)}{b'}$$

et donc,

$$-K \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{b'} h = \frac{K'}{b'} h_s$$

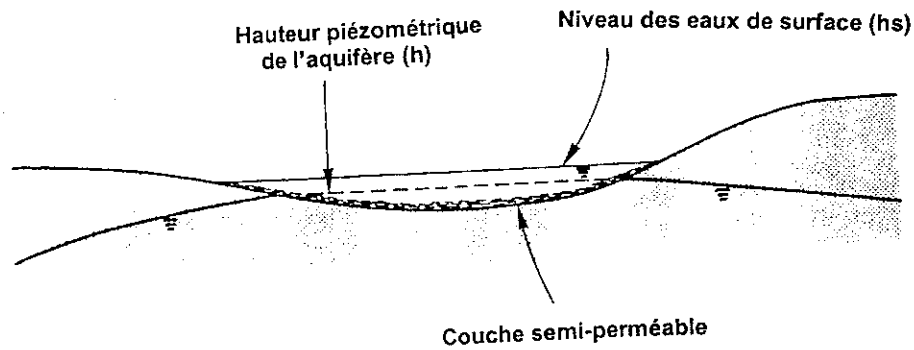


Fig.VIII.3 : Condition mixte où le débit dépend d'un potentiel.

VIII.3 Méthodes de résolution

Pour résoudre les équations différentielles décrivant l'écoulement de fluide en milieu poreux, on recourt souvent aux méthodes numériques plutôt que d'utiliser des solutions analytiques. Les principales raisons de cet usage sont (de Marsily, 1986) :

- les conditions aux frontières peuvent être variables dans le temps, inégales, de géométrie complexe et irrégulière, alors que pour les solutions analytiques, le milieu doit être considéré comme infini ou semi-infini ;

- les paramètres intervenant dans les équations peuvent être source de non linéarités, les solutions analytiques ne permettant généralement pas d'en tenir compte ;

- les propriétés des différentes formations formant le milieu poreux peuvent varier fortement dans l'espace, une hétérogénéité très marquée peut être prise en compte, alors que les solutions analytiques supposent le milieu homogène et de géométrie simple ;

- les sollicitations externes du système (infiltration, puits, sources, venues d'eau,...) doivent être représentées le plus exactement possible et éventuellement par d'autres points, des lignes ou une intégrale sur un intervalle ;

- parfois, des solutions analytiques peuvent être trouvées mais leurs expressions sont très complexes et leur programmation demande beaucoup plus d'efforts numériques (programmation et de temps ingénieur CPU).

Les principales méthodes numériques utilisées en hydrogéologie sont la méthode des différences finies et celle des éléments finis.

La méthode des différences finies utilise la discrétisation par différences finies de l'équation différentielle dans le domaine à simuler. L'approximation par différences finies de l'équation différentielle consiste à remplacer les dérivées spatiales et temporelles par des différences finies. Les cellules sont généralement carrées ou rectangulaires et leurs dimensions sont choisies en fonction de la précision voulue.

La méthode des éléments finis permet une discrétisation en éléments à deux ou trois dimensions. Les éléments peuvent avoir des formes variées : triangles, quadrilatères ou autres. Dans chaque élément, la variable inconnue h (x, y, z) est exprimée à partir des fonctions d'interpolations linéaires ou paraboliques, lesquelles s'expriment à partir des coordonnées

des nœuds. Le champ complet est substitué par un nombre fini de champs partiels, liés par des conditions de continuité, exprimées aux nœuds. La solution h (x, y, z) est construite à partir d'une combinaison linéaire de toutes les fonctions élémentaires.

Pour résoudre un problème transitoire dans le temps, on réalise une discrétisation temporelle, de manière à ce que la solution du problème soit calculée en un nombre fini d'instants choisi par l'utilisateur.

L'équation différentielle s'écrit :

$$\frac{\underline{H}(t+\Delta t)-\underline{H}(t)}{\Delta t} = \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{\underline{T}}.\underline{H} - \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{Q} \qquad \text{(VIII.11)}$$

avec $\underline{\underline{S}}$ = matrice diagonale N x N des coefficients d'emmagasinement

Différents schémas d'intégration temporelle sont utilisés :

schéma d'intégration explicite :

Par développement de Taylor, le terme $\underline{H}(t+\Delta t)$ est approximé par :

$$\underline{H}(t+\Delta t) \approx \underline{H}(t) + \Delta t.\frac{\partial \underline{H}(t)}{\partial t}$$

et donc $\frac{\underline{H}(t+\Delta t)-\underline{H}(t)}{\Delta t} = \frac{\partial \underline{H}(t)}{\partial t} = \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{\underline{K}}.\underline{H}(t) - \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{Q}(t)$

$\underline{H}(t)$ étant connue, $\underline{H}(t+\Delta t)$ est exprimé explicitement.

Le terme dérivé est donc approximé à partir de la variation piézométrique estimée sur l'intervalle de temps qui précède l'instant auquel les flux sont calculés.

schéma d'intégration implicite :

Par développement de Taylor, le terme $\underline{H}(t)$ est approximé par

$$\underline{H}(t) \approx \underline{H}(t+\Delta t) - \Delta t\frac{\partial \underline{H}(t+\Delta t)}{\partial t}$$

et donc $\frac{\underline{H}(t+\Delta t)-\underline{H}(t)}{\Delta t} = \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{\underline{K}}.\underline{H}(t+\Delta t) - \underline{\underline{S}}^{-1}.\underline{Q}(t+\Delta t)$

ou encore $\left[\frac{1}{\Delta t}.\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{K}}\right].\underline{H}(t+\Delta t) = \frac{1}{\Delta t}.\underline{\underline{S}}.\underline{H}(t) - \underline{Q}(t+\Delta t)$

L'équation est écrite au temps t+Δt ; la solution est calculée en inversant la matrice
$\left[\frac{1}{\Delta t}.\underline{\underline{S}}^{-1} - \underline{\underline{K}}\right]$.

Le schéma d'intégration linéaire, qui est le plus souvent utilisé s'exprime par :

$$h_{i,j}(t_1) = h_{i,j}(t+\Delta t).\theta + h_{i,j}(t).(1-\theta) \qquad \text{(VIII.12)}$$

où θ est le paramètre d'intégration temporelle compris entre 0 et 1

$h_{i,j}$ est la hauteur piézométrique en un nœud (ou point central) repéré par les indices i et j ;

t est l'instant de début du pas de temps ;

t + Δt est l'instant de fin du pas de temps,

$t \leq t_1 < t + \Delta t$.

θ = 0 ; on a un schéma d'intégration explicite ;

θ = 1, on a un schéma d'intégration implicite ;

$\theta = \frac{1}{2}$, on a un schéma de Crank-Nicholson.

En pratique, on utilise souvent θ compris entre 0.55 et 0.6 (G de Marsily, 1981).

Les pas de temps sont choisis en respectant des critères numériques garantissant la précision, la stabilité et la convergence de la solution. Les critères varient d'une méthode numérique à l'autre et d'un schéma d'intégration temporelle à l'autre.

La condition de convergence implique que la solution numérique calculée tend, au cours des itérations successives, vers une solution unique. Généralement, un critère de convergence ne peut être obtenu que pour des cas simples. Dans la plupart des cas pratiques, il est impossible d'établir la

convergence de façon rigoureuse ; on se contente de comparer les résultats à des solutions analytiques.
La stabilité dans la réponse obtenue en fonction du temps influence le choix des pas de temps à choisir en fonction de la méthode numérique et du schéma d'intégration temporel.

Pour la méthode des différences finies, le choix d'intégration implicite ($\theta = 1$ dans l'équation VIII.12) est inconditionnellement stable et le schéma explicite ($\theta = 0$) donne lieu à un critère de stabilité qui peut s'écrire (dans le cas 2D, linéaire,...) :

$$0 < \Delta t < \frac{1}{2}\,\frac{S}{T}\,\frac{(\Delta x)^2.(\Delta y)^2}{(\Delta x)^2+(\Delta y)^2} \qquad \text{(VIII.13)}$$

(d'après Bear & Veruijt, 1987, cité par A.Dassargues, 1992)

où Δx et Δy sont les taille (supposées constantes) des cellules selon les axes principaux

Pour la méthode des éléments finis, les travaux en analyse modale de Hogge & Nyssen (1977) de l'Université de Liège, ont débouché sur l'établissement d'un critère de stabilité en considérant l'équation à 1 dimension en milieu homogène :

- inconditionnellement stable si $\theta \geq \frac{1}{2}$
- $\Delta t < \frac{2}{(1-2.\theta).\lambda}$ pour $\theta < \frac{1}{2}$ (VIII.14)

où λ (toujours positif) dépend exclusivement des caractéristiques du système.

Pour ce type de problème, les schémas de Crank-Ncholson ($\theta = \frac{1}{2}$), de Galerkin ($\theta = \frac{2}{3}$) et implicite ($\theta = 1$) sont inconditionnellement stables pour tout pas de temps.

La précision des solutions calculées est mise en rapport avec la taille des pas de temps utilisés. On peut s'attendre que, pour un phénomène montrant de fortes variations sur un court laps de temps, il sera difficile d'atteindre une bonne précision si les pas de temps de la simulation sont grands.
Les schémas d'intégration temporelle les plus utilisés sont ceux de Crank-Nicholson ($\theta = 1/2$) et de Galerkin ($\theta = 2/3$).

VIII.4. Modèle de la nappe de la basse Rusizi

Le cadre géologique, géomorphologique, hydrologique et hydrogéologique de la basse Rusizi a été discuté en détail au chapitre III du présent travail. Pour rappel, la basse Rusizi est recouverte par les alluvions des affluents de la Rusizi dans sa partie orientale et occidentale ; les dépôts lacustres dans sa partie centrale ; les dépôts fluviatiles de la Rusizi et les cordons littoraux localisés tout près du lac Tanganyika.

La nappe aquifère se trouve dans les sables grossiers à graveleux qui sont intercalés dans les dépôts fluviatiles , dans les sables fins de dépôts lacustres ainsi que dans les sables grossiers de cordons littoraux aux abords du lac Tanganyika.
La nappe est alimentée par l'infiltration directe, le débordement des rivières pendant la période de hautes eaux et par l'écoulement hypodermique dans les colluvions de pentes au pied des contreforts.

VIII.4.1. Hypothèses de travail

Le modèle conceptuel admet quelques hypothèses :

- les terrains sont incompressibles, c'est-à-dire qu'on ne prend pas en compte d'éventuels processus de tassement et de consolidation du milieu pouvant modifier leurs propriétés d'écoulement ;

- le milieu est poreux et isotrope ;

- la loi de Darcy est applicable ;

- le régime d'écoulement est permanent, les sollicitations de l'aquifère sont donc constantes et le régime d'équilibre est atteint ;

- l'eau est à température constante ;

- les propriétés telles que la porosité et les conductivités hydrauliques se rapportent à l'Elément de Volume Représentatif (E.V.R) et sont considérées comme significatives pour le modèle ;

- la nappe est considérée comme captive sur toute l'étendue de la plaine ;

- le modèle sera 2D monocouche horizontal (tenant compte de données existantes) ;
- la composante verticale de la vitesse de l'eau est négligée .

VIII.4.2. Logiciels utilisés

Le modèle est réalisé avec le logiciel GMS (Groundwater Modelling System ; ECGL, 1998) couplé au logiciel MODFLOW (a Modular three dimensional finite difference water Flow ; MacDonald &Harbaugh, 1988).

Le programme GMS sert de pré et post processeur pour l'élaboration de modèles mathématiques d'écoulement et de transport.

Le programme GMS permet de créer des couches d'information indépendantes qui contiennent les données utilisées par le modèle (zones de recharge, sources/sinks , perméabilités, points d'observation...).

Par interpolation de données ponctuelles introduites dans le modèle, GMS permet de constituer des données couvrant tout le domaine à modéliser.

La présentation des résultats du modèle est également facilitée par le programme : celui-ci permet entre autre de visualiser les résultats du modèle après chaque simulation : cartes piézométriques, flux vitesse d'écoulement, bilans de la nappe etc...

Le logiciel Modflow est un code qui utilise les différences finies pour résoudre l'équation d'écoulement sur le domaine concerné avec des conditions précisées aux frontières.

L'approximation de l'équation différentielle de l'écoulement consiste à remplacer les dérivées spatiales et temporelles par des différences finies. Le principe consiste à chercher la valeur numérique de la hauteur piézométrique au centre de chaque cellule du domaine discrétisé. Une seule équation est trouvée pour chaque cellule. En résolvant le système de n = i x j (i = nombre de colonnes, j = nombres de lignes) équations algébriques et n inconnues (les hauteurs piézométriques), on trouve la solution approchée du problème.

La résolution du système s'effectue par itérations successives. On définit un critère de convergence fixant l'erreur tolérée. Lorsque la plus grande différence, entre les valeurs de hauteurs piézométriques calculées par deux itérations successives est inférieure au critère spécifié, le processus s'arrête et les hauteurs piézométriques calculées lors de la dernière itération sont prises comme solution.

Pour les simulations impliquant plus d'une couche, le logiciel calcule un coefficient de drainance basé sur l'épaisseur de couches et les valeurs de transmissivités verticales introduites, ce coefficient représente les flux verticaux entre les couches.

Pour résoudre un problème transitoire, une discrétisation temporelle est nécessaire afin de calculer la solution du problème en un nombre fini d'instants. Les intervalles entre ces instants sont définis comme les pas de temps de la simulation et les dérivées temporelles sont également approchées par différences finies.

VIII.4.3. Extension du modèle

La basse Rusizi est délimitée à l'Est, Ouest et Nord-Est par les contreforts constitués de roches précambriennes, au Nord-Ouest par la moyenne Rusizi au Sud-Est par le prolongement de la plaine dans la ville de Bujumbura et au Sud par le lac Tanganyika (fig.VIII.4). La rivière Rusizi et le lac Tanganyika constituent les exutoires des nappes de la plaine.

Ainsi délimitée, la plaine de la basse Rusizi a une superficie de 610.20 km² répartie comme suit :

- sur la rive gauche de la Rusizi (côté burundais) : 426.27 km² ;
- entre la petite et la grande Rusizi : 43.38 km² ;
- sur la rive droite de la Rusizi (côté congolais) : 140.55 km².

VIII.4.4. Conditions aux limites

Deux types de conditions ont été imposées au modèle. Il s'agit de la condition de potentiel imposé (condition de Dirichlet) et de la condition de flux nul.

La condition de potentiel imposé est spécifiée :

- au lac Tanganyika : niveau moyen du lac (774 m) ;
- à la limite entre la basse et la moyenne Rusizi : niveaux extrapolés de la nappe (sur base des mesures historiques);
- sur la rivière Rusizi : niveaux moyens la rivière ;
- au Sud-Est de la basse Rusizi ,prolongement de la plaine dans la ville de Bujumbura : niveaux extrapolés de la nappe(sur base des mesures historiques).

La condition de flux nul est un cas particulier de la condition Neumann (flux imposé), elle est spécifiée à la limite entre la plaine et les contreforts. Elle se justifie par le fait que les limites latérales au contact avec les contreforts sont considérées comme peu perméables par rapport aux dépôts fluvio-lacustres.

VIII.4.5. Discrétisation du modèle

En tenant compte des données géologiques et hydrogéologiques actuellement disponibles, la nappe de la basse Rusizi est discrétisée par un modèle monocouche, avec des mailles carrées centrées de 250 m de côté (fig.VIII.5). La grille du maillage est orientée suivant les directions Nord - Sud (axe y) et Ouest - Est (axe x) avec :

- la longueur totale de l'axe x = 31.75 km ;
- la longueur totale de l'axe y = 29 km ;
- la dimension de chaque cellule = 250 x 250 m ;
- nombre total de cellules = 14732.

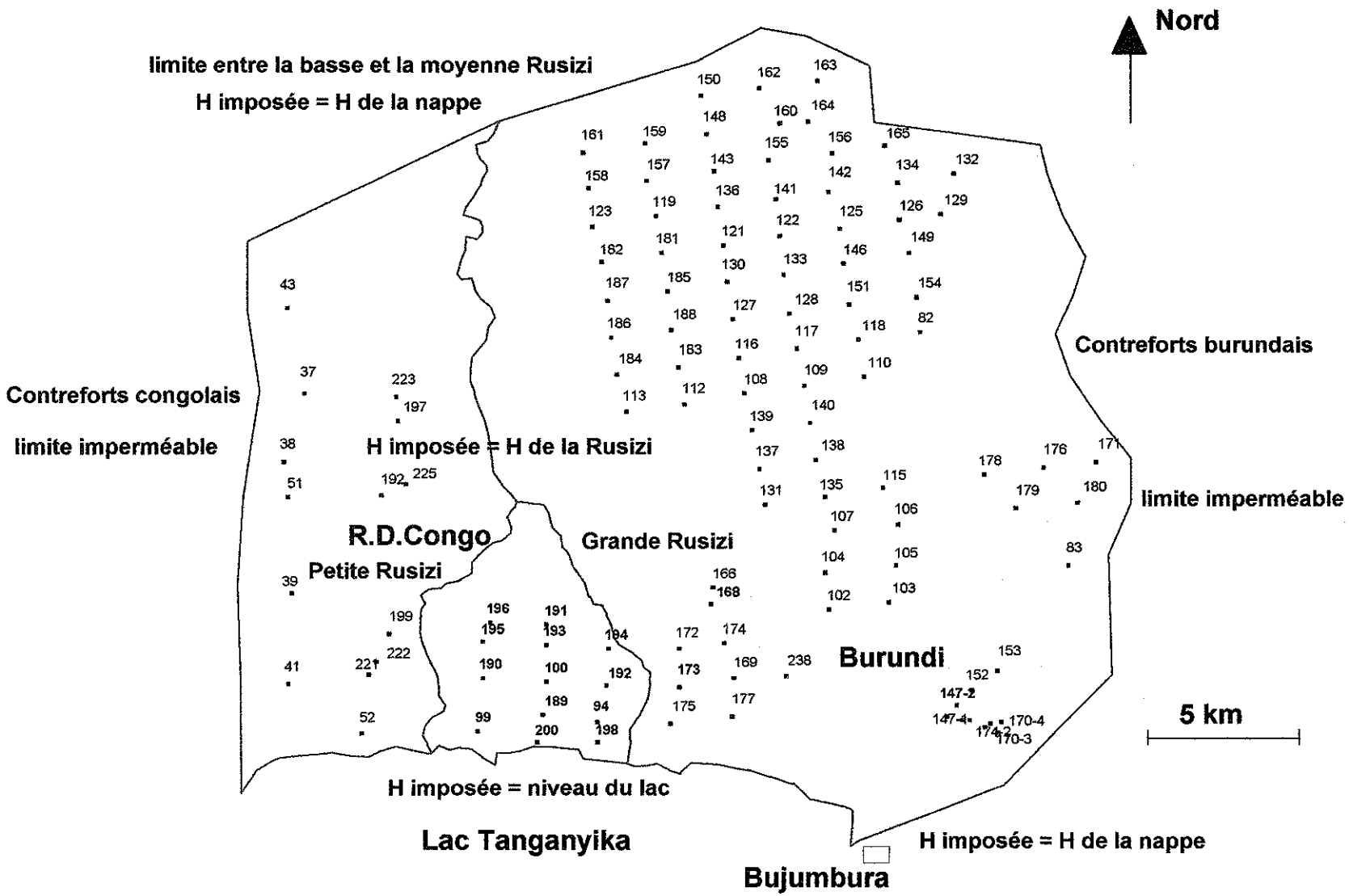


Fig.VIII.4: Extension du modèle et conditions aux limites

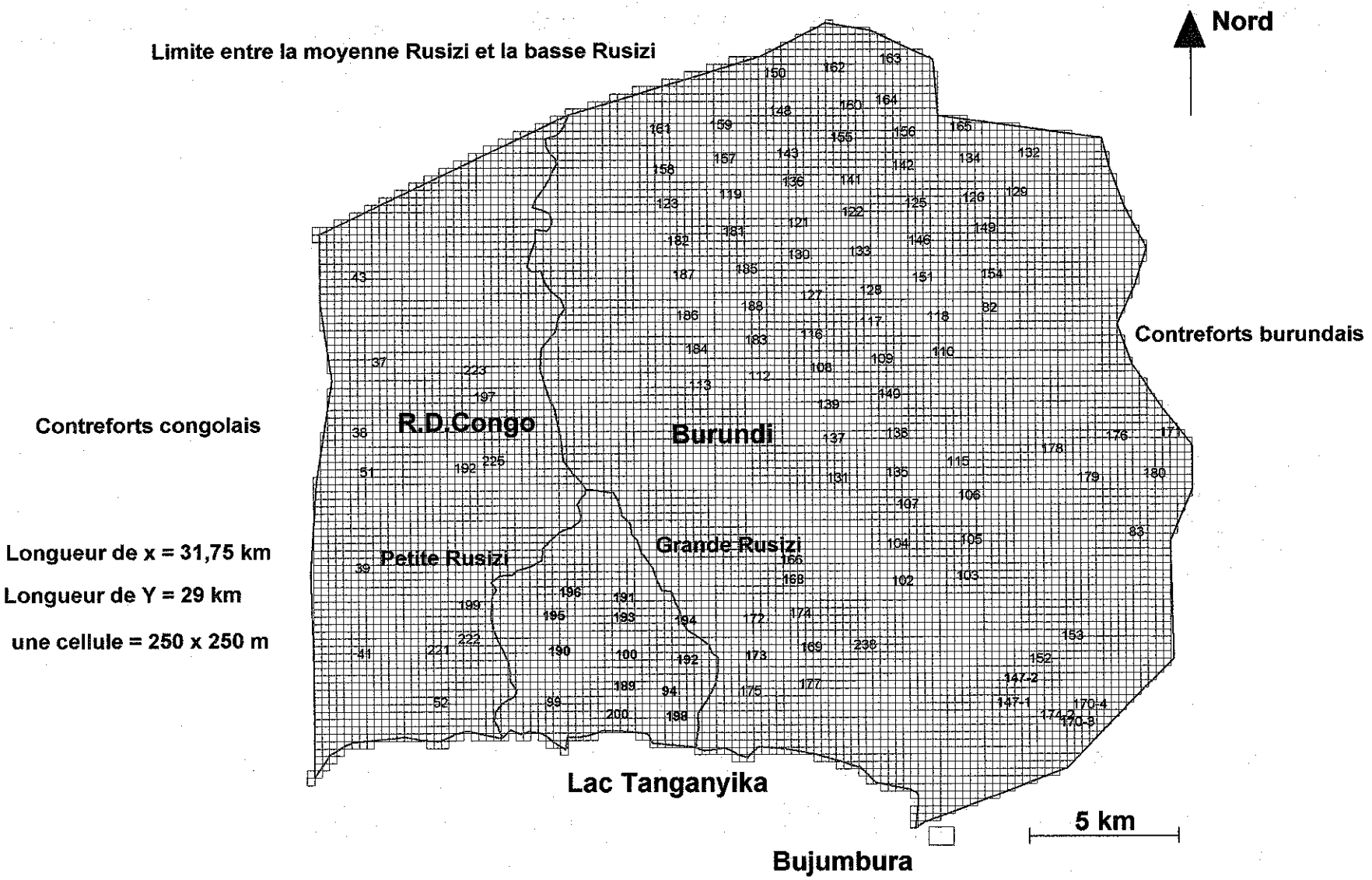


Fig. VIII.5: Discrétisation du modèle

VIII.4.6. Données du modèle

Les données introduites dans le modèle sont : les cotes du sol au droit des forages, les cotes de la base et du sommet de l'aquifère, les niveaux piézométriques mesurés dans les forages, les niveaux moyens extrapolés de la Rusizi, le niveau moyen du lac (774 m) sur toute sa frontière avec la plaine, les niveaux moyens extrapolés de la nappe entre la moyenne et la basse Rusizi et à la limite Sud-Est du modèle.

Les conductivités hydrauliques sont introduites par zones, sur base des valeurs locales déterminées par essais de pompage et interprétées au chapitre VI .

La recharge introduite dans le modèle comprend l'infiltration efficace dans la plaine et les infiltrations par les berges et les débordements des rivières pendant la période de hautes eaux. L'infiltration efficace reste faible, sur une période de 15 ans, la hauteur moyenne annuelle d'eau utile calculée à la station de Bujumbura aéroport est égale à 76 mm. A cause de l'irrégularité des précipitations, il arrive que certaines années hydrologiques ne fournissent pas d'eau utile.

Les bilans hydrogéologiques établis à Mpanda, à l'échelle axe D localisé au milieu de la plaine, pendant la période 1982-1987, présentent un écart de fermeture qui varie entre 127 et 258 mm/an, avec une moyenne de 170 mm/an (cfr V.). La recharge qui a eu lieu pendant la période de référence (1953-1958) n'est pas connue ; n'ayant pas de données de fluctuations piézométriques pour déterminer la recharge de la nappe de la basse Rusizi, nous avons introduit successivement dans le modèle une recharge de 200 et 100 mm/an soit respectivement 6.34 x 10^{-9} et 3.17 x 10^{-9} m/s.

VIII.4.7. Calibration du modèle

La calibration consiste à reproduire par le modèle les niveaux piézométriques mesurés dans les forages. Par essais et erreurs, les valeurs des paramètres du modèle sont modifiées pour approcher autant que possible les valeurs de hauteurs piézométriques calculées par le modèle avec celles mesurées.

Le modèle n'étant qu'une approximation du système réel, la calibration est considérée comme valable lorsque en chaque point de mesure, la différence entre la hauteur piézométrique mesurée (h_{me}) et la hauteur piézométrique calculée (h_{ca}) est considérée comme « acceptable ». La contrainte qui nous est imposée est de rester dans les limites de valeurs de conductivités hydrauliques telles qu'interprétées dans chaque zone à l'issue des essais de pompage.

La piézométrie de référence sur laquelle le modèle est calibré correspond aux relevés effectués entre 1953 -1958 par le Service géologique du Congo belge et Ruanda-Urundi. La hauteur piézométrique la plus élevée a été mesurée dans le forage Ru 171 (853 m) situé à la périphérie orientale de la plaine. Le niveau moyen du lac Tanganyika (774 m) constitue l'exutoire le plus bas de nappe.

Comme il n'y a pas d'exploitation intensive de la nappe, à part quelques puits exploités localement et, par manque de mesures récentes de la piézométrie de la nappe de la basse Rusizi, nous considérons que les conditions piézométriques n'ont pas beaucoup varié. Dans un premier temps, une recharge uniforme de 200 mm/an a été introduite dans le modèle.

Dans les secteurs qui n'ont pas été explorés par les forages et essais de pompage, nous avons introduit des valeurs de K proches de celles qui sont calculées dans les secteurs avoisinants.

A chaque simulation, les hauteurs mesurées dans les 116 forages sont comparées avec les hauteurs calculées par le modèle. Après plusieurs modifications des valeurs de K pour rapprocher h_{ca} et h_{me} à chaque point d'observation , nous avons obtenu les valeurs qui sont reprises au tableau 8.1. La comparaison entre h_{ca} et h_{me} est visualisée par la fig.VIII.6. Si en chaque point de contrôle, h_{me} était égale à h_{ca}, les points de coordonnées (h_{me} et h_{ca}) se trouveraient sur une droite1/1. On observe que tous les points de contrôle se répartissent sur ou autour de cette droite.

Le tableau 8.1 montre que dans les 116 forages, l'écart entre la hauteur piézométrique calculée et observée est inférieure à 2 m dans 68 forages et 9 forages seulement enregistrent un écart supérieur à 5 m. Le plus grand écart (6.79 m) est observé dans le forage Ki 51, localisé à l'extrémité occidentale de la plaine.

La carte piézométrique déduite du modèle (fig.VIII.7) est proche de la piézométrie de référence à l'exception de la zone où sont localisés les forages 115, 105 et 106 où h_{ca} est plus haute de 5 m part rapport h me

Néanmoins, pour certains secteurs, nous avons du introduire dans le modèle des conductivités hydrauliques plus élevées que celles déterminées par essais de pompage. Par exemple, dans le secteur situé près du lac Tanganyika (zone 15) nous avons introduit dans le modèle une conductivité hydraulique égale à 1.5×10^{-2} m/s (fig. VIII.8).

	Forage		h_{me} (m)	h_{ca} (m)	Ecart (m)			Forage		h_{me} (m)	h_{ca} (m)	Ecart (m)
1	Ru 150		819.55	820.69	-1.14		41	Ru 184		785.45	786.35	-0.90
2	Ru 162		830.00	829.54	0.46		42	Ru 183		784.90	789.96	-5.06
3	Ru 163		852.40	849.04	3.36		43	Ru 116		798.66	795.54	3.12
4	Ru 161		801.88	802.44	-0.56		44	Ru 117		800.90	800.64	0.26
5	Ru 159		805.85	809.76	-3.91		45	Ru 118		805.20	805.72	-0.52
6	Ru 148		816.16	814.86	1.30		46	Ru 82		804.50	808.97	-4.47
7	Ru 160		827.10	827.24	-0.14		47	Ru 113		788.39	783.47	4.92
8	Ru 164		831.70	833.11	-1.41		48	Ru 112		788.80	786.13	2.67
9	Ru 158		801.35	800.72	0.63		49	Ru 108		792.30	791.85	0.45
10	Ru 157		808.30	807.70	0.60		50	Ru 109		800.00	798.00	2.00
11	Ru 143		812.12	812.73	-0.61		51	Ru 110		802.15	803.10	-0.95
12	Ru 155		817.25	816.94	0.31		52	Ru 139		789.70	790.28	-0.58
13	Ru 156		824.30	825.86	-1.56		53	Ru 140		794.39	795.43	-1.04
14	Ru 165		828.55	826.85	1.70		54	Ru 137		787.76	789.33	-1.57
15	Ru 123		797.50	797.72	-0.22		55	Ru 138		790.95	793.23	-2.28
16	Ru 119		803.00	804.40	-1.40		56	Ru 131		786.95	787.79	-0.84
17	Ru 136		811.30	809.52	1.78		57	Ru 135		790.95	791.48	-0.53
18	Ru 141		813.25	814.46	-1.21		58	Ru 115		791.20	797.17	**-5.97**
19	Ru 142		822.26	819.01	3.25		59	Ru 178		810.00	809.73	0.27
20	Ru 134		822.30	823.44	-1.14		60	Ru 176		826.95	830.31	-3.36
21	Ru 132		831.37	826.60	4.77		61	Ru 171		853.00	851.14	1.86
22	Ru 182		791.29	795.75	-4.46		62	Ru 107		785.97	789.91	-3.94
23	Ru 181		800.00	800.80	-0.80		63	Ru 106		790.80	796.41	**-5.61**
24	Ru 121		802.77	805.74	-2.97		64	Ru 179		822.75	825.00	-2.25
25	Ru 122		810.38	809.40	0.98		65	Ru 180		850.00	851.16	-1.16
26	Ru 125		813.85	813.33	0.52		66	Ru 104		782.76	786.52	-3.76
27	Ru 126		816.00	817.38	-1.38		67	Ru 105		786.77	792.73	**-5.96**
28	Ru 129		824.05	822.11	1.94		68	Ru 172		771.68	776.46	-4.78
29	Ru 187		794.10	792.64	1.46		69	Ru 174		774.00	777.74	-3.74
30	Ru 185		794.94	797.73	-2.79		70	Ru 166		779.19	779.28	-0.09
31	Ru 130		802.40	802.18	0.22		71	Ru 168		777.50	778.58	-1.08
32	Ru 133		809.65	805.72	3.93		72	Ru 102		781.36	783.05	-1.69
33	Ru 146		810.40	809.02	1.38		73	Ru 103		784.82	787.98	-3.16
34	Ru 149		808.30	813.29	-4.99		74	Ru 83		850.00	852.64	-2.64
35	Ru 186		789.05	789.50	-0.45		75	Ru 173		776.50	775.56	0.94
36	Ru 188		792.89	794.32	-1.43		76	Ru 169		770.41	777.06	-6.65
37	Ru 127		795.00	799.10	-4.10		77	Ru 238		777.35	778.28	-0.93
38	Ru 128		804.35	803.63	0.72		78	Ru 153		803.40	804.93	-1.53
39	Ru 151		807.80	807.40	0.40		79	Ru 152		794.80	796.69	-1.89
40	Ru 154		810.85	810.59	0.26		80	Ru 175		772.36	774.74	-2.38

	Forage		h_{me} (m)	h ca (m)	Ecart (m)			Forage		h_{me} (m)	h ca (m)	Ecart (m)
81	Ru 177		774.53	776.12	-1.59		99	Ru 189		771.97	775.12	-3.15
82	Ru 147-1		785.00	789.23	-4.23		100	Ru 94		773.88	774.75	-0.87
83	Ru 147-2		787.44	790.77	-3.33		101	Ru 200		772.83	774.10	-1.27
84	Ru167-1		795.80	791.98	3.82		102	Ru 198		772.84	774.32	-1.48
85	Ru167-2		791.70	794.81	-3.11		103	Ki 43		821.50	821.28	0.22
86	Ru170-1		805.90	804.34	1.56		104	Ki 37		806.70	812.21	-5.51
87	Ru 170-2		805.92	805.97	-0.05		105	Ki 223		807.10	801.44	5.66
88	Ru 170-3		812.44	811.84	0.60		106	KI 197		801.90	799.12	2.78
89	Ru 170-4		811.58	813.67	-2.09		107	Ki 38		806.50	806.37	0.13
90	Ru 191		774.32	776.13	-1.81		108	KI 51		797.96	804.75	**-6.79**
91	Ru 196		775.78	776.05	-0.27		109	Ki 225		798.90	794.46	4.44
92	Ru 195		775.64	775.93	-0.29		110	Ki 192		801.90	798.06	3.84
93	Ru 193		774.46	776.12	-1.66		111	KI 39		797.00	801.03	-4.03
94	Ru 194		773.75	775.13	-1.38		112	Ki 41		793.10	792.95	0.15
95	Ru 190		774.08	775.53	-1.45		113	Ki 221		790.00	787.02	2.98
96	Ru 100		774.53	775.80	-1.27		114	Ki 222		790.20	786.95	3.25
97	Ru 192		772.75	775.18	-2.43		115	KI 199		791.40	786.08	5.32
98	Ru 99		776.04	774.52	1.52		116	KI 52		782.80	779.30	3.50

Tableau 8.1 : Hauteurs piézométriques mesurées et calculées (Recharge = 200 mm / an)

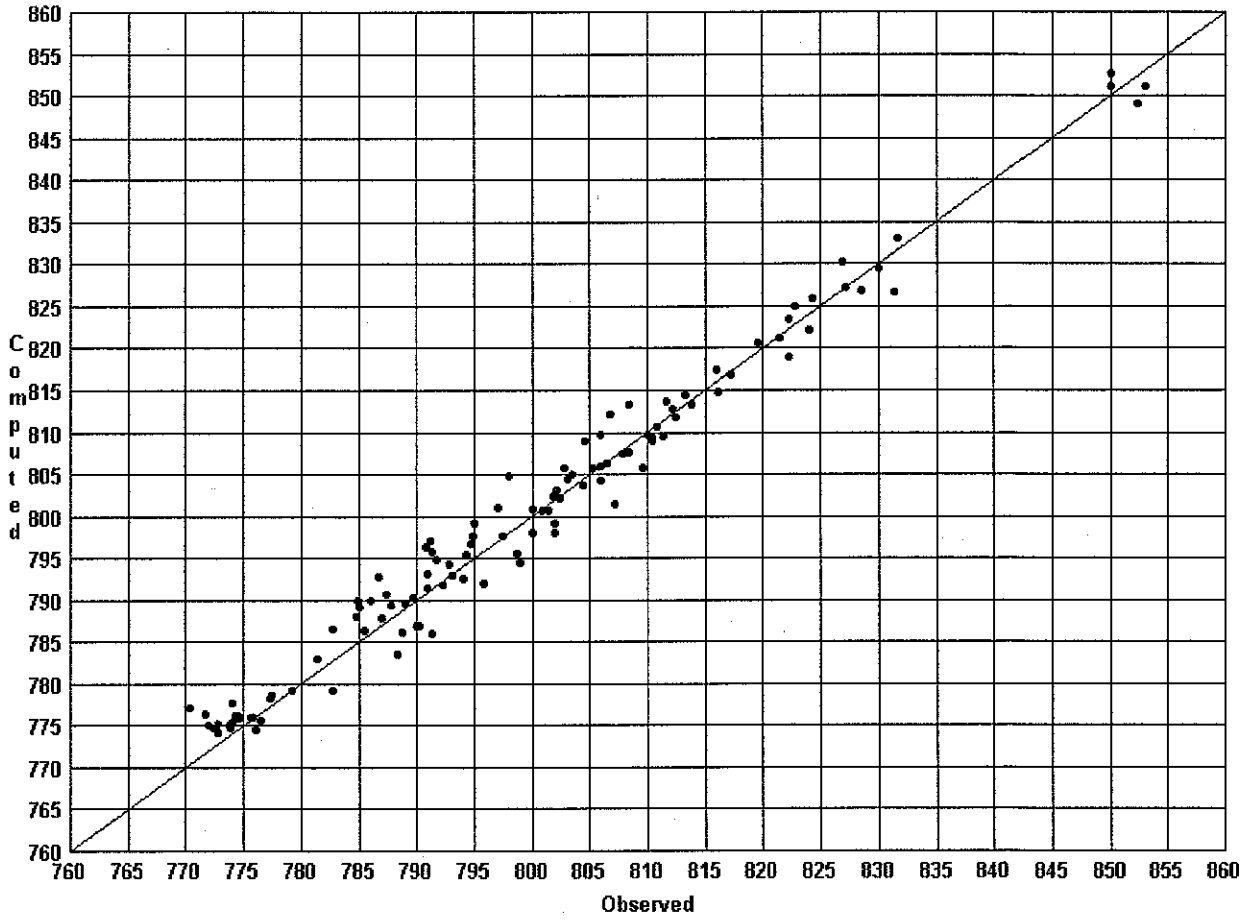


Fig.VIII.6 : Comparaison des hauteurs piézométriques observées et calculées par le modèle (Recharge = 200mm / an soit $6.34\times10^{-9} m/s$)

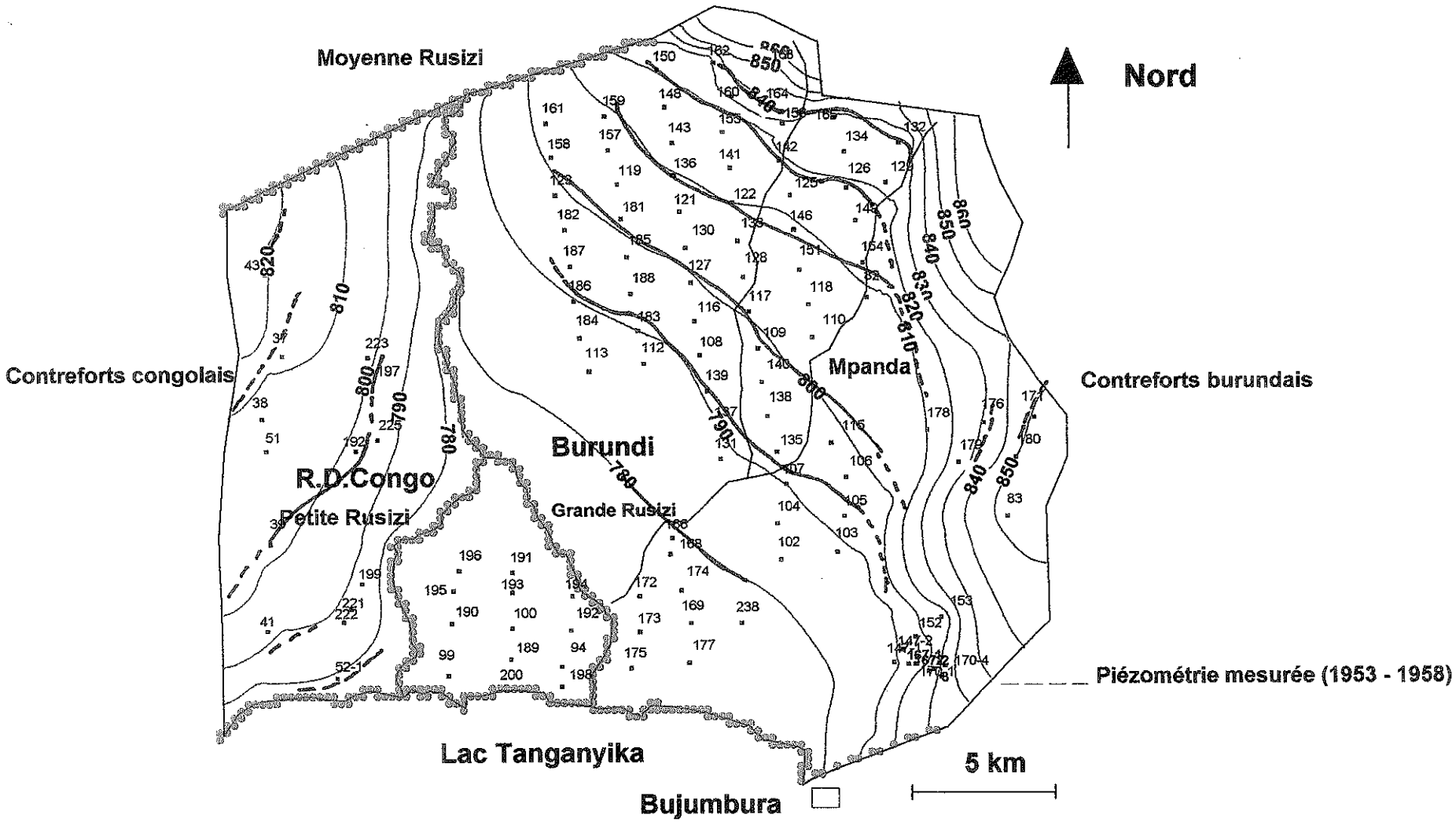


Fig.VIII.7 : Carte piézométrique déduite du modèle

(Recharge = 200 mm / an)

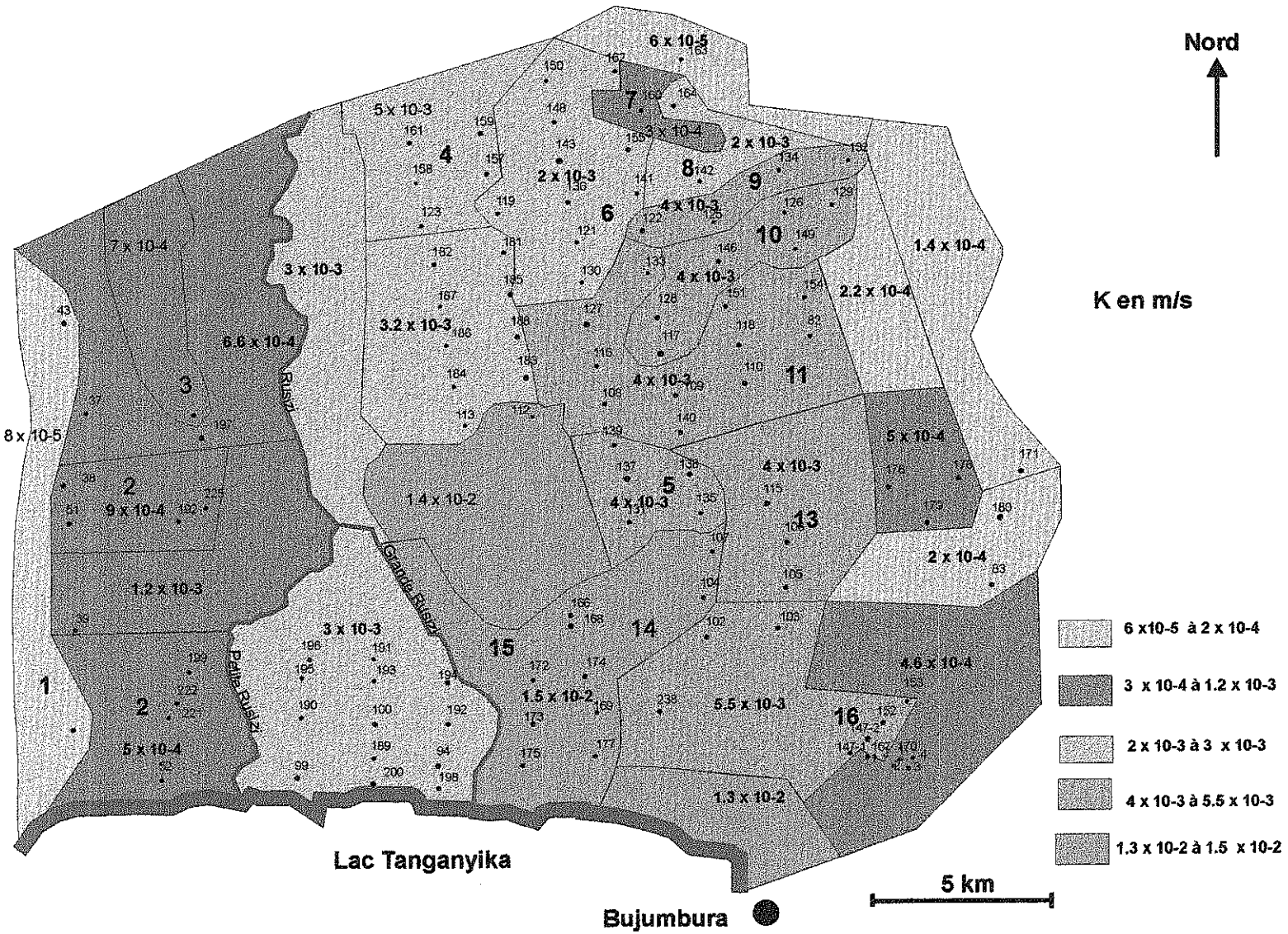


Fig VIII.8: Conductivités hydrauliques introduites dans le modèle
(Recharge = 200 mm/an)

Par la suite, nous avons réalisé une deuxième calibration après avoir introduit dans le modèle une recharge uniforme de 100 mm/an, soit 3.17 x 10-9 m/s. Après plusieurs modifications des valeurs de K dans les différents secteurs de la plaine, les hauteurs piézométriques calculées par le modèle sont reprises au tableau 8.2 et leur comparaison avec les hauteurs mesurées est reprise à la fig. VIII.9. L'écart entre h_{me} et h_{ca} est inférieur à 2 m dans 66 forages et seuls les forages Ru 115, 106, 105, 169 (partie burundaise), Ki 37 et Ki 51 (partie congolaise) enregistrent une écart entre h_{me} et h_{ca} supérieur à 5 m.

La carte piézométrique (fig.VIII.10) obtenue n'est pas très différente de celle obtenue avec une recharge de 200 mm/an, mais les conductivités hydrauliques introduites dans le modèle se rapprochent plus de celles calculées par essais de pompage.

De façon globale, nous considérons que le modèle est bien calibré ; les écarts entre h_{me} et h_{ca} peuvent être expliqués par le fait que les mesures n'ont pas été effectuées au même moment (la période de référence s'étend de 1953 à 1958) et par les diverses simplifications faites lors de la conceptualisation du modèle.

Les conductivités hydrauliques introduites dans le modèle (fig.VIII.11) sont dans les limites des intervalles de valeurs définis au chapitre VI, à l'exception de deux petites zones présentant des valeurs de K extrêmes : ce sont la zone 9 où les conductivités hydrauliques (très élevées) obtenues par essais de pompage ont été divisées par 10, et la zone 5 (K très faibles) où les valeurs de K ont été multipliées par 10, pour restituer au mieux la piézométrie mesurée.

Les conductivités hydrauliques fournies par le modèle dans les secteurs où elles n'étaient pas connues, peuvent être considérées comme acceptables par rapport à la nature lithologique des dépôts:

- dans les parties orientale et occidentale de la plaine (au pied des contreforts), les conductivités hydrauliques y sont faibles, la nappe se trouve principalement dans des colluvions de pentes ;

- dans les dépôts lacustres (4, 4.1, 4.2 et 5) , K calculée par le modèle dans le secteur 4.2 est assez élevée, elle est comparable avec celle calculée dans la zone (15) voisine de dépôts littoraux.

	Forage		h_{me} (m)	h_{ca} (m)	Ecart (m)		Forage		h_{me} (m)	h_{ca} (m)	Ecart (m)
1	Ru 150		819.55	820.70	-1.15	41	Ru 184		785.45	786.14	-0.69
2	Ru 162		830.00	829.54	0.46	42	Ru 183		784.90	789.72	-4.82
3	Ru 163		852.40	848.99	3.41	43	Ru 116		798.66	795.39	3.27
4	Ru 161		801.88	802.44	-0.56	44	Ru 117		800.90	800.43	0.47
5	Ru 159		805.85	809.87	-4.02	45	Ru 118		805.20	805.45	-0.25
6	Ru 148		816.16	814.91	1.25	46	Ru 82		804.50	808.60	-4.10
7	Ru 160		827.10	827.21	-0.11	47	Ru 113		788.39	783.17	5.22
8	Ru 164		831.70	833.05	-1.35	48	Ru 112		788.80	785.69	3.11
9	Ru 158		801.35	800.74	0.61	49	Ru 108		792.30	791.59	0.71
10	Ru 157		808.30	807.82	0.48	50	Ru 109		800.00	797.80	2.20
11	Ru 143		812.12	812.79	-0.67	51	Ru 110		802.15	802.78	-0.63
12	Ru 155		817.25	816.92	0.33	52	Ru 139		789.70	790.08	-0.38
13	Ru 156		824.30	825.78	-1.48	53	Ru 140		794.39	795.35	-0.96
14	Ru 165		828.55	826.74	1.81	54	Ru 137		787.76	789.13	-1.37
15	Ru 123		797.50	797.75	-0.25	55	Ru 138		790.95	793.35	-2.40
16	Ru 119		803.00	804.57	-1.57	56	Ru 131		786.95	787.62	-0.67
17	Ru 136		811.30	809.55	1.75	57	Ru 135		790.95	791.53	-0.58
18	Ru 141		813.25	814.41	-1.16	58	Ru 115		791.20	796.92	**-5.72**
19	Ru 142		822.26	818.90	3.36	59	Ru 178		810.00	809.51	0.49
20	Ru 134		822.30	823.31	-1.01	60	Ru 176		826.95	830.97	-4.02
21	Ru 132		831.37	826.58	4.79	61	Ru 171		853.00	850.37	2.63
22	Ru 182		791.29	795.78	-4.49	62	Ru 107		785.97	789.92	-3.95
23	Ru 181		800.00	800.95	-0.95	63	Ru 106		790.80	796.12	**-5.32**
24	Ru 121		802.77	805.73	-2.96	64	Ru 179		822.75	825.34	-2.59
25	Ru 122		810.38	809.30	1.08	65	Ru 180		850.00	850.96	-0.96
26	Ru 125		813.85	813.15	0.70	66	Ru 104		782.76	786.54	-3.78
27	Ru 126		816.00	817.18	-1.18	67	Ru 105		786.77	792.66	**-5.89**
28	Ru 129		824.05	821.96	2.09	68	Ru 172		771.68	776.45	-4.77
29	Ru 187		794.10	792.61	1.49	69	Ru 174		774.00	777.66	-3.66
30	Ru 185		794.94	797.80	-2.86	70	Ru 166		779.19	779.23	-0.04
31	Ru 130		802.40	802.11	0.29	71	Ru 168		777.50	778.55	-1.05
32	Ru 133		809.65	805.56	4.09	72	Ru 102		781.36	783.06	-1.70
33	Ru 146		810.40	808.79	1.61	73	Ru 103		784.82	788.01	-3.19
34	Ru 149		808.30	813.03	-4.73	74	Ru 83		850.00	852.60	-2.60
35	Ru 186		789.05	789.39	-0.34	75	Ru 173		776.50	775.56	0.94
36	Ru 188		792.89	794.27	-1.38	76	Ru 169		770.41	777.05	**-6.64**
37	Ru 127		795.00	798.97	-3.97	77	Ru 238		777.35	778.28	-0.93
38	Ru 128		804.35	803.45	0.90	78	Ru 153		803.40	804.91	-1.51
39	Ru 151		807.80	807.15	0.65	79	Ru 152		794.80	796.68	-1.88
40	Ru 154		810.85	810.29	0.56	80	Ru 175		772.36	774.74	-2.38

	Forage		h_{me}	h_{ca}	Ecart		Forage		h_{me}	h_{ca}	Ecart
			(m)	(m)	(m)				(m)	(m)	(m)
81	Ru 177		774.53	776.12	-1.59	99	Ru 189		771.97	775.12	-3.15
82	Ru 147-1		785.00	789.22	-4.22	100	Ru 94		773.88	774.75	-0.87
83	Ru 147-2		787.44	790.77	-3.33	101	Ru 200		772.83	774.10	-1.27
84	Ru167-1		795.80	791.97	3.83	102	Ru 198		772.84	774.32	-1.48
85	Ru167-2		791.70	794.80	-3.10	103	Ki 43		821.50	821.26	0.24
86	Ru170-1		805.90	804.31	1.59	104	Ki 37		806.70	812.15	**-5.45**
87	Ru 170-2		805.92	805.92	0.00	105	Ki 223		807.10	801.31	**5.79**
88	Ru 170-3		812.44	811.79	0.65	106	KI 197		801.90	798.92	2.98
89	Ru 170-4		811.58	813.62	-2.04	107	Ki 38		806.50	806.34	0.16
90	Ru 191		774.32	776.13	-1.81	108	KI 51		797.96	804.74	**-6.78**
91	Ru 196		775.78	776.05	-0.27	109	Ki 225		798.90	794.22	4.68
92	Ru 195		775.64	775.93	-0.29	110	Ki 192		801.90	797.92	3.98
93	Ru 193		774.46	776.12	-1.66	111	KI 39		797.00	801.48	-4.48
94	Ru 194		773.75	775.13	-1.38	112	Ki 41		793.10	793.91	-0.81
95	Ru 190		774.08	775.53	-1.45	113	Ki 221		790.00	787.79	2.21
96	Ru 100		774.53	775.80	-1.27	114	Ki 222		790.20	787.79	2.41
97	Ru 192		772.75	775.18	-2.43	115	KI 199		791.40	786.69	4.71
98	Ru 99		776.04	774.52	1.52	116	KI 52		782.80	779.73	3.07

h_{me} = hauteur piézométrique mesurée sur terrain

h_{ca} = hauteur piézométrique calculée par le modèle

Tableau 8.2 Hauteurs piézométriques mesurées et calculées (Recharge = 100 mm / an)

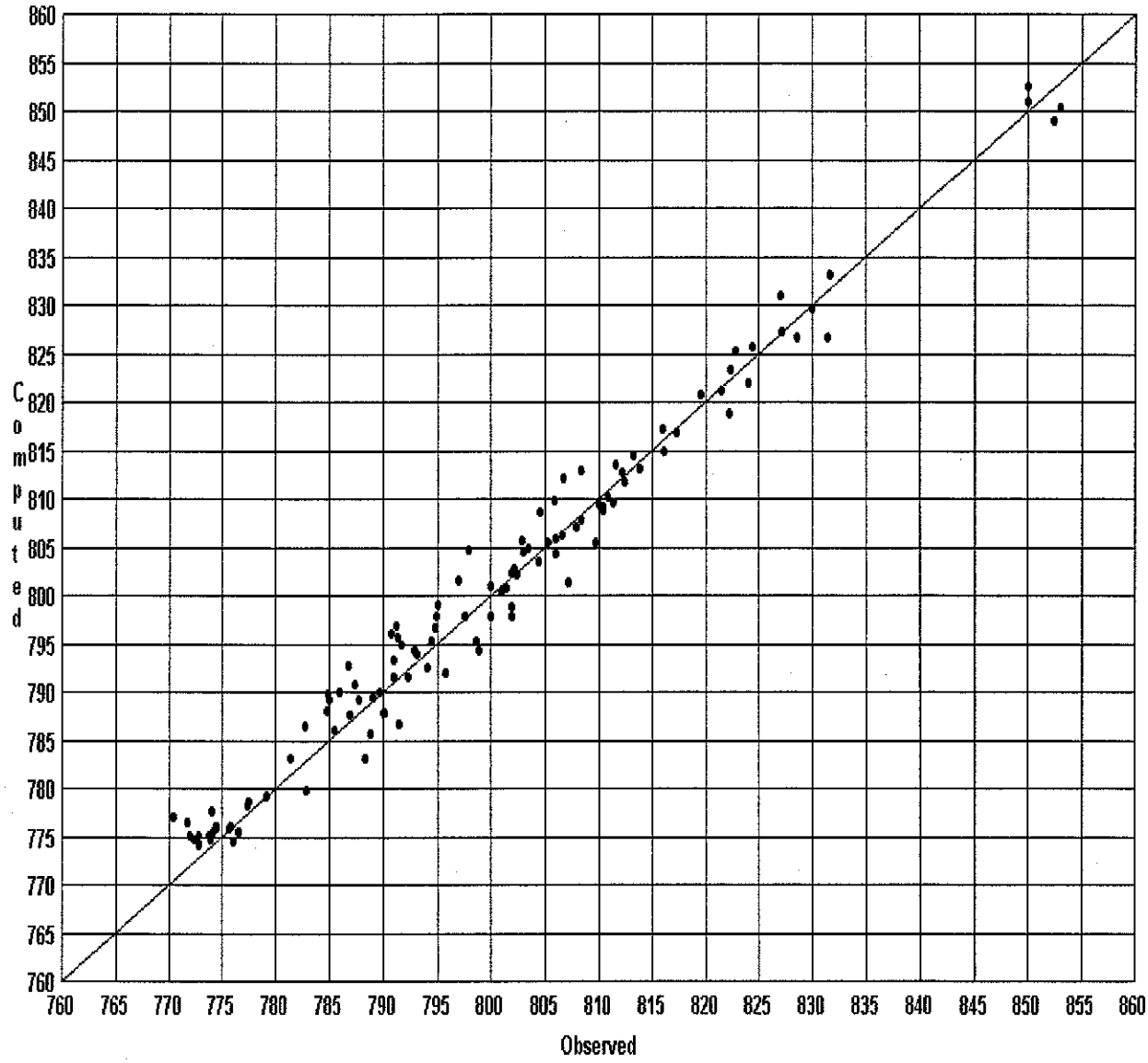


Fig. VIII.9 : Comparaison des hauteurs piézométriques mesurées et observées (recharge = 100 mm/an soit $3.17\times10^{-9} m/s$)

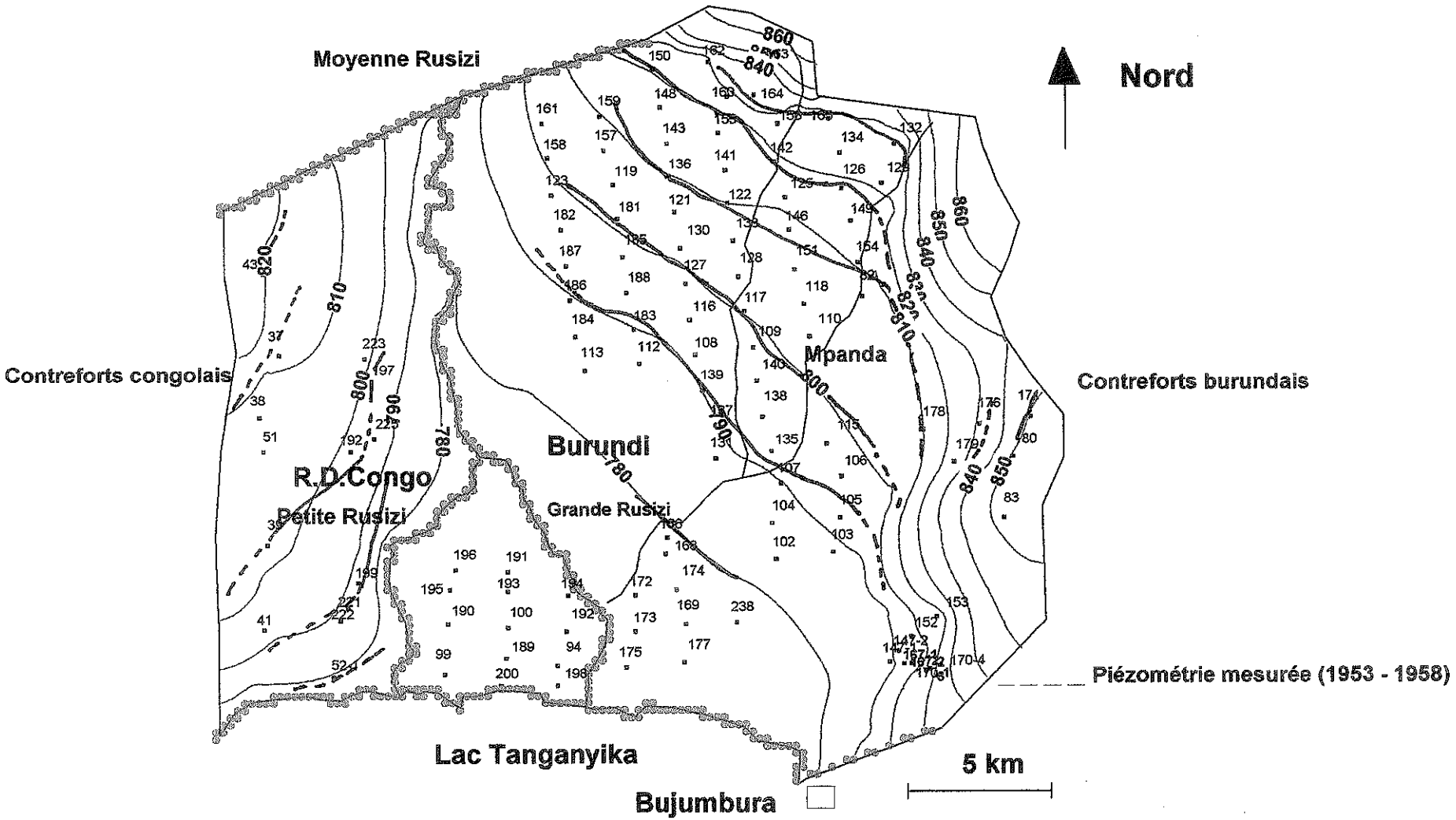
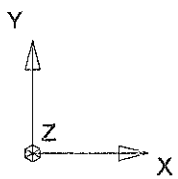


Fig.VIII.10 : Carte piézométrique déduite du modèle

(Recharge = 100 mm / an)



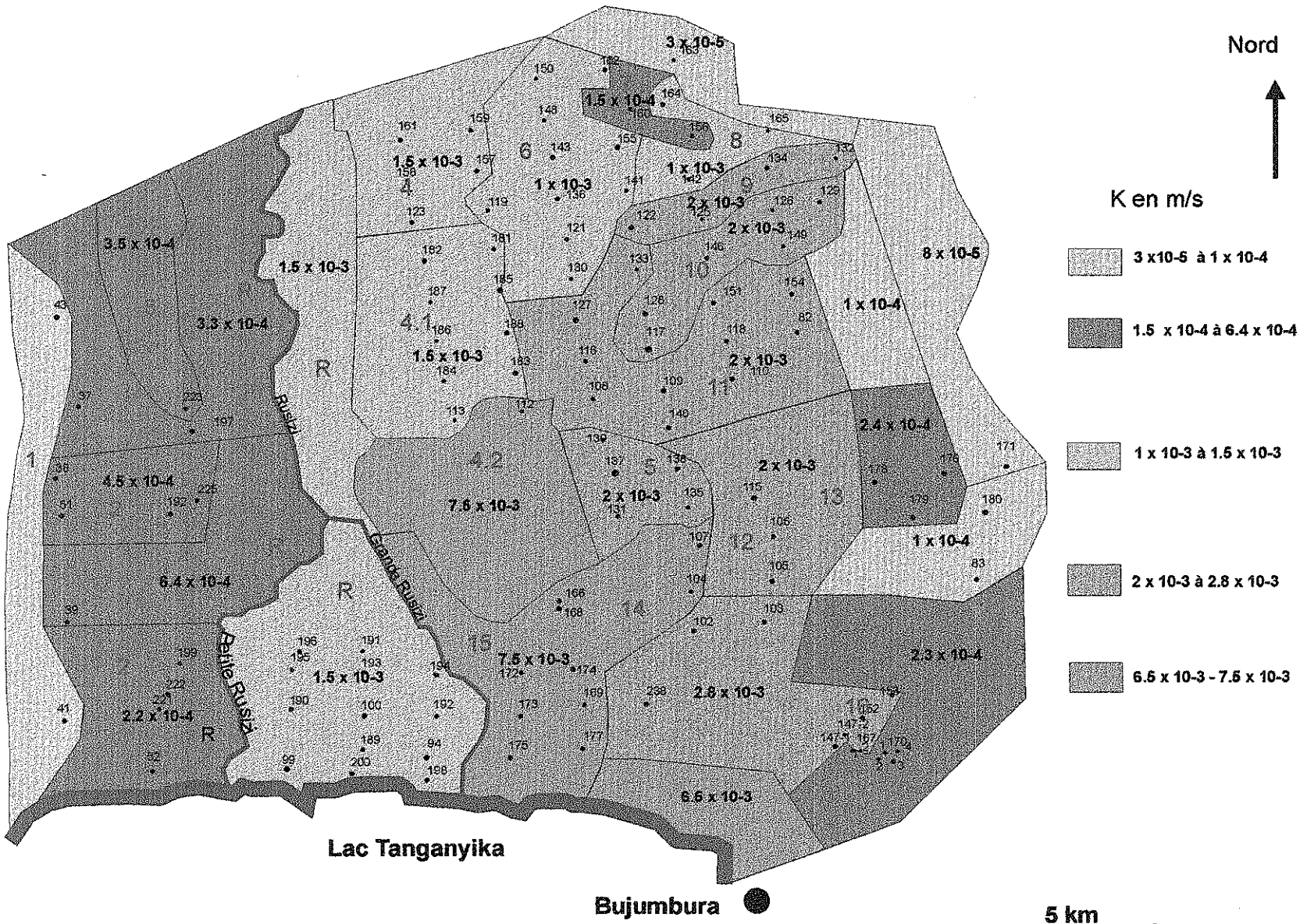


Fig VIII.11 Conductivités hydrauliques introduites dans le modèle
(Recharge = 100 mm/an)

N°	Forage	Δ_{me} (m)	Δ_{mo} (m)	$\Delta_{me}-\Delta_{mo}$ (m)		N°	Forage	Δ_{me} (m)	Δ_{mo} (m)	$\Delta_{me}-\Delta_{mo}$ (m)
1	Ru 150	0.35	0.23	0.12		30	Ru 185	0.12	0.21	-0.09
2	Ru 162	0.26	0.85	-0.59		31	Ru 130	0.60	0.31	0.29
3	Ru 163	0.28	3.26	-2.98		32	Ru 133	0.85	0.30	0.55
4	Ru 161	1.13	0.08	1.05		33	Ru 146	0.09	0.15	-0.06
5	Ru 159	1.80	0.07	1.73		34	Ru 149	0.03	0.39	-0.36
6	Ru 148	0.07	0.28	-0.21		35	Ru 186	0.16	0.16	0.00
7	Ru 160	3.40	1.18	2.22		36	Ru 188	0.15	0.17	-0.02
8	Ru 164	0.08	0.82	-0.74		37	Ru 127	1.21	0.12	1.09
9	Ru 158	1.00	0.12	0.88		38	Ru 128	0.00	0.29	-0.29
10	Ru 157	1.30	0.11	1.19		39	Ru 151	0.49	0.76	-0.27
11	Ru 143	0.07	0.18	-0.11		40	Ru 154	0.73	0.27	0.46
12	Ru 155	0.28	0.28	0.00		41	Ru 184	1.34	0.12	1.22
13	Ru 156	1.95	1.13	0.82		42	Ru 183	0.76	0.15	0.61
14	Ru 165	0.22	0.85	-0.63		43	Ru 116	3.96	0.18	3.78
15	Ru 123	0.18	0.12	0.06		44	Ru 117	0.00	0.22	-0.22
16	Ru 119	0.50	0.24	0.26		45	Ru 118	0.75	0.24	0.51
17	Ru 136	0.00	0.35	-0.35		46	Ru 82	1.5	0.30	1.20
18	Ru 141	0.22	0.23	-0.01		47	Ru 113	0.59	0.10	0.49
19	Ru 142	0.11	0.44	-0.33		48	Ru 112	**6.17**	**0.10**	**6.07**
20	Ru 134	0.04	0.47	-0.43		49	Ru 108	1.41	0.12	1.29
21	Ru 132	0.00	0.45	-0.45		50	Ru 109	**10.00**	**0.23**	**9.77**
22	Ru 182	0.52	0.14	0.38		51	Ru 110	0.57	0.13	0.44
23	Ru 181	1.50	0.19	1.31		52	Ru 139	0.76	0.08	0.68
24	Ru 121	**6.85**	**0.22**	**6.63**		53	Ru 140	0.66	0.25	0.41
25	Ru 122	0.00	0.55	-0.55		54	Ru 137	1.46	0.18	1.28
26	Ru 125	0.15	0.57	-0.42		55	Ru 138	0.76	0.16	0.60
27	Ru 126	1.40	0.49	0.91		56	Ru 131	4.15	0.23	3.92
28	Ru 129	0.15	0.51	-0.36		57	Ru 135	1.15	0.17	0.98
29	Ru 187	0.29	0.19	0.10		58	Ru 115	0.22	0.20	0.02

N°	Forage	Δ_{me} (m)	Δ_{mo} (m)	$\Delta_{me}-\Delta_{mo}$ (m)		N°	Forage	Δ_{me} (m)	Δ_{mo} (m)	$\Delta_{me}-\Delta_{mo}$ (m)
59	Ru 178	0.31	0.34	-0.03		88	Ru 170-3	0.42	1.48	-1.06
60	Ru 176	0.27	0.74	-0.47		89	Ru 170-4	0.21	1.78	-1.57
61	Ru 171	0.32	2.12	-1.80		90	Ru 191	0.00	0.10	-0.10
62	Ru 107	0.12	0.13	-0.01		91	Ru 196	0.00	0.07	-0.07
63	Ru 106	0.00	0.21	-0.21		92	Ru 195	0.00	0.10	-0.10
64	Ru 179	0.09	0.87	-0.78		93	Ru 193	0.00	0.10	-0.10
65	Ru 180	0.16	0.04	0.12		94	Ru 194	0.00	0.07	-0.07
66	Ru 104	0.09	0.13	-0.04		95	Ru 190	0.06	0.08	-0.02
67	Ru 105	0.24	0.17	0.07		96	Ru 100	0.00	0.09	-0.09
68	Ru 172	0.27	0.03	0.24		97	Ru 192	0.81	0.09	0.72
69	Ru 174	0.46	0.03	0.43		98	Ru 99	0.00	0.09	-0.09
70	Ru 166	0.09	0.07	0.02		99	Ru 189	0.00	0.09	-0.09
71	Ru 168	0.70	0.06	0.64		100	Ru 94	**18.52**	**0.08**	**18.44**
72	Ru 102	0.53	0.10	0.43		101	Ru 200	2.85	0.00	2.85
73	Ru 103	0.99	0.21	0.78		102	Ru 198	0.92	0.06	0.86
74	Ru 83	0.08	2.29	-2.21		103	Ki 43	2.10	0.46	1.64
75	Ru 173	0.06	0.02	0.04		104	Ki 37	0.00	0.31	-0.31
76	Ru 169	0.04	0.04	0.00		105	Ki 223	0.25	0.27	-0.02
77	Ru 238	**16.67**	**0.11**	**16.56**		106	KI 197	0.00	0.23	-0.23
78	Ru 153	3.18	0.42	2.76		107	Ki 38	0.90	0.17	0.73
79	Ru 152	2.00	0.27	1.73		108	KI 51	0.30	0.06	0.24
80	Ru 175	0.04	0.01	0.03		109	Ki 225	0.60	0.19	0.41
81	Ru 177	0.18	0.03	0.15		110	Ki 192	0.80	0.17	0.63
82	Ru 147-1	0.54	0.14	0.40		111	KI 39	0.90	0.19	0.71
83	Ru 147-2	0.00	0.21	-0.21		112	Ki 41	1.50	0.10	1.40
84	Ru167-1	0.04	0.36	-0.32		113	Ki 221	0.60	0.29	0.31
85	Ru167-2	0.45	0.76	-0.31		114	Ki 222	0.70	0.28	0.42
86	Ru170-1	0.22	1.06	-0.84		115	KI 199	1.25	0.33	0.92
87	Ru 170-2	0.04	1.27	-1.23		116	KI 52	0.23	0.14	0.09

Δ_{me} = rabattement mesuré

Δ_{mo} = rabattement calculé par le modèle

Tableau 8.4 : Rabattements mesurés et calculés (Recharge = 100 mm/an)

En plus des simplifications faites lors de la conceptualisation du modèle, qui induisent des différences entre les mesures de terrain et celles calculées par le modèle, les écarts observés peuvent être expliqués par d'autres facteurs :

- l'hétérogénéité du milieu : on peut observer au tableau 8.3 que les rabattements mesurés pour un même débit, pour des forages proches

sont très variables et reflètent probablement les variations spatiales des caractéristiques du milieu, le modèle ne permet pas de représenter toutes ces variations très locales ;

- dans le modèle, le programme calcule une valeur de h au centre de chaque cellule qui est une valeur moyenne sur l'EVR. Il existe un lissage des variations spatiales de hauteurs piézométriques . Si la taille de la cellule est grande, le lissage est prononcé et les valeurs calculées par le modèle sont moins précises.

Localement, des écarts élevés entre Δ_{me} et Δ_{mo} sont constatés dans les forages Ru 121, 112 ,109, 238 et Ru 94 où les rabattements prédits par le modèle sont très faibles par rapport aux rabattements mesurés. Les conductivités ayant été introduites par zone (et non par forage), nous avons tenu compte de l'ensemble des valeurs de K interprétée dans chaque zone. En exemple, mis à part la valeur de K (2.2×10^{-5} m/s) interprétée dans le forage Ru 121, tous les autres forages localisés dans la zone 6 fournissent des valeurs de K comprises entre 8.3×10^{-4} et 3.3×10^{-3} m/s et la valeur moyenne introduite dans le modèle est égale à 1×10^{-3} m/s. Dans le cas des forages Ru 238 et 94 situés à proximité du lac Tanganyika et de la Rusizi, les rabattements mesurés (16.67 m et 18.52 m) nous semblent surestimés par comparaison à ceux mesurés dans les forages voisins (Ru 169 et 198).

Dans les forages implantés à l'extrémité orientale de la plaine, les rabattements prédits par le modèle sont plus élevés que ceux observés par essais de pompage. C'est le cas notamment de 15 forages suivants : Ru 163, Ru 148, Ru 164, Ru 165, Ru 149, Ru 176, Ru 171, Ru 179, Ru 180, Ru 83, Ru 167-1, Ru 170-1, Ru 170-2 et Ru 170-4. Dans ce secteur, les conductivités moyennes introduites dans le modèle, quoique plus faibles que celles déduites de l'interprétation des essais de pompage, sont en accord avec la localisation de ces forages (colluvions de pentes).

VIII.4.9. Résultats du modèle

Le modèle a permis d'approximer les conductivités hydrauliques les plus probables dans les secteurs qui n'ont pas été explorés par les forages et confirme l'hétérogénéité de la nappe aquifère de la basse Rusizi.

Par rapport aux autres secteurs de la plaine, les parties orientale et occidentale, situées à la limite entre la plaine et les contreforts sont moins perméables, avec des valeurs de K comprises entre 3×10^{-5} et 2.3×10^{-4} m/s.

Dans la partie congolaise, à la limite entre la plaine et les contreforts, K est de l'ordre de 4×10^{-5} m/s. Dans les dépôts fluviatiles, les valeurs de K sont comprises entre 2.2×10^{-4} et 6.4×10^{-4} m/s. Dans les dépôts lacustres, K est de l'ordre de 3.5×10^{-4} m/s .

Dans la partie burundaise, en allant de l'Est vers la rivière Rusizi, le modèle fournit les conductivités hydrauliques suivantes :

- à la limite entre la plaine et les contreforts, K est comprise entre 3×10^{-5} et 2.4×10^{-4} m/s ;
- dans les dépôts fluviatiles des affluents de la Rusizi (zones 6,8,9,10,11, et 16), K est comprise entre 1×10^{-3} et 2.8×10^{-3} m/s ;
- dans les dépôts lacustres (zones 4, 4.1, 4.2,et 5), K est comprise entre 1.5×10^{-3} et 7.5×10^{-3} m/s ;
- dans les dépôts de cordons littoraux (zones13,14 et 15), K est comprise entre 2×10^{-3} et 7.5×10^{-3} m/s ;
- dans les dépôts fluviatiles de la Rusizi (R) , K est comprise entre 2.2×10^{-4} et 1.5×10^{-3} m/s.

Le modèle a permis de visualiser les directions de flux dans toute la basse Rusizi (fig.VIII.12). Les flux principaux sont concentrés dans les zones où les conductivités hydrauliques sont élevées, au bord de la grande Rusizi et du lac Tanganyika.

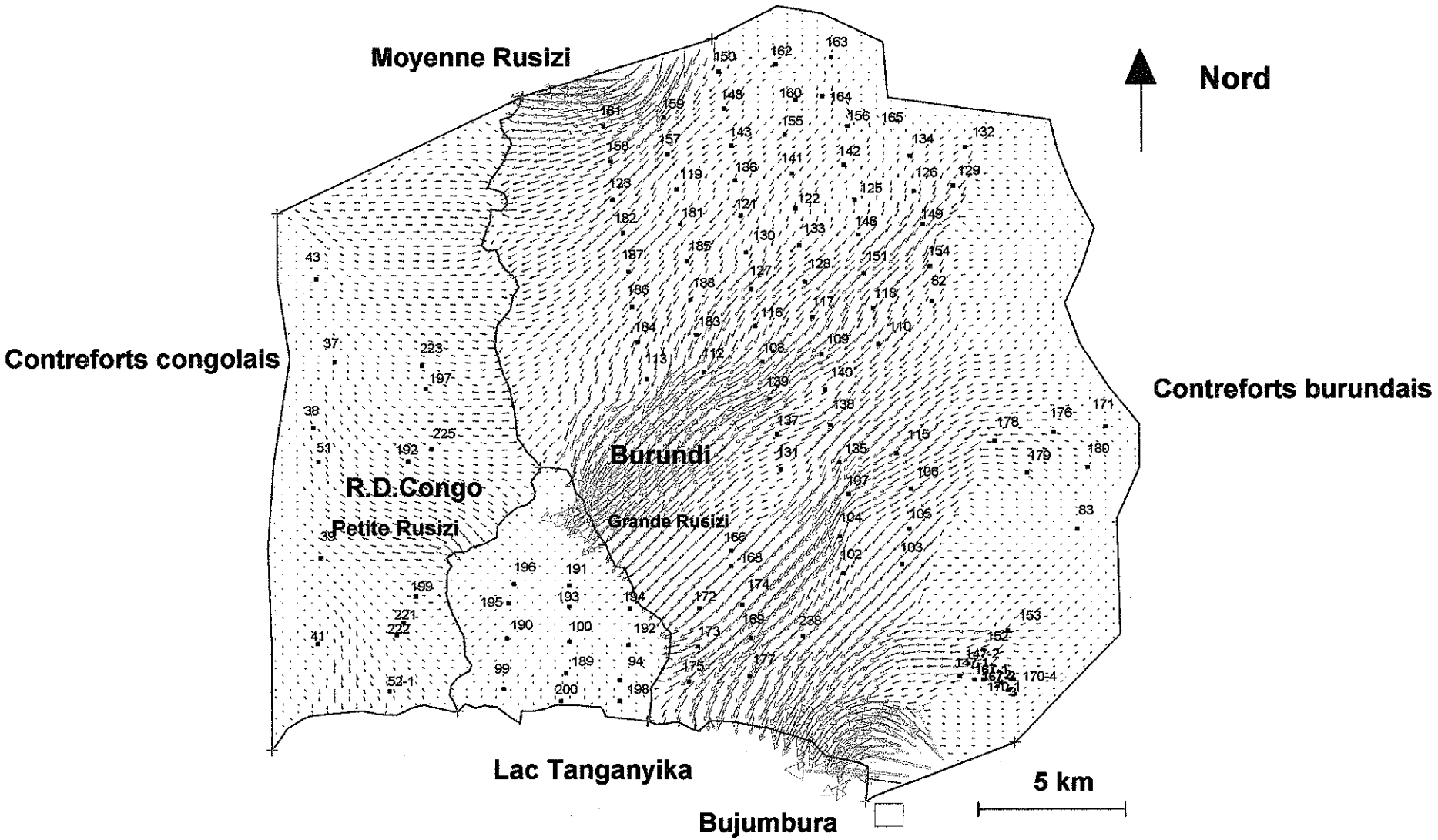


Fig.VIII.12: Directions des flux calculés par le modèle

Aux différentes limites à potentiel imposé, le modèle a permis d'estimer les échanges qui s'effectuent entre la nappe aquifère et la rivière Rusizi d'une part, entre la nappe et le lac Tanganyika d'autre part (fig.VIII.13).

Les débits entrant dans le modèle se répartissent comme suit :

- entre la moyenne et la basse Rusizi (côté congolais) , Q_1 = 0.044 m³/s ;
- entre la moyenne et la basse Rusizi (côté burundais), Q_2 = 0.078 m³/s ;
- à la limite Sud-Est (côté burundais), Q_3= 0.511 m³/s .

La recharge de 100 mm /an se répartit comme suit :

- la partie congolaise (140.55 km²), R_1= 0.45 m³/s ;

- la partie burundaise :

  - entre la petite et la grande Rusizi (43.88 km²), R_2= 0.14 m³/s ;
  - sur la rive gauche de la Rusizi (426.27 km²), R_3 = 1.35 m³/s.

Les débits entrant dans le modèle sont estimés à :

$Q_1 + Q_2 + Q_3 + R_1 + R_2 + R_3$=0.044 +0.078+0.511+0.45 + 0.14 +1.35 = 2.57 m³/s

Les débits sortant du modèle vers la rivière Rusizi et le lac Tanganyika se répartissent comme suit:

- de la limite Nord jusqu'à sa scission en grande et petite Rusizi : Q_4=0.58 m³/s ;
- au niveau de la petite Rusizi : Q_5 = 0.195 m³/s ;
- au niveau de la grande Rusizi : Q_6 = 0.716 m³/s ;
- entre la plaine congolaise et le lac Q_7= 0.067 m³/s ;
- entre les deux Rusizi et le lac : Q_8 = 0.039 m³/s ;
- entre la plaine burundaise et le lac : Q_9 = 0.929 m³/s.

Les débits totaux sortant du modèle sont estimés à :

$Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$ = 0.58 +0.195 +0.716 + 0.067 + 0.039 + 0.929 = 2.53 m³/s

Le bilan obtenu par le modèle est quasi équilibré car l'ensemble des débits entrants (2.57 m³/s) correspond plus ou moins aux flux sortants (2.53 m³/s).

On observe que plus de la moitié des débits sortent par la grande Rusizi et le lac Tanganyika (côté burundais). Au total, la Rusizi draine 1,491 m³/s et le lac Tanganyika 1.035 m³/s.

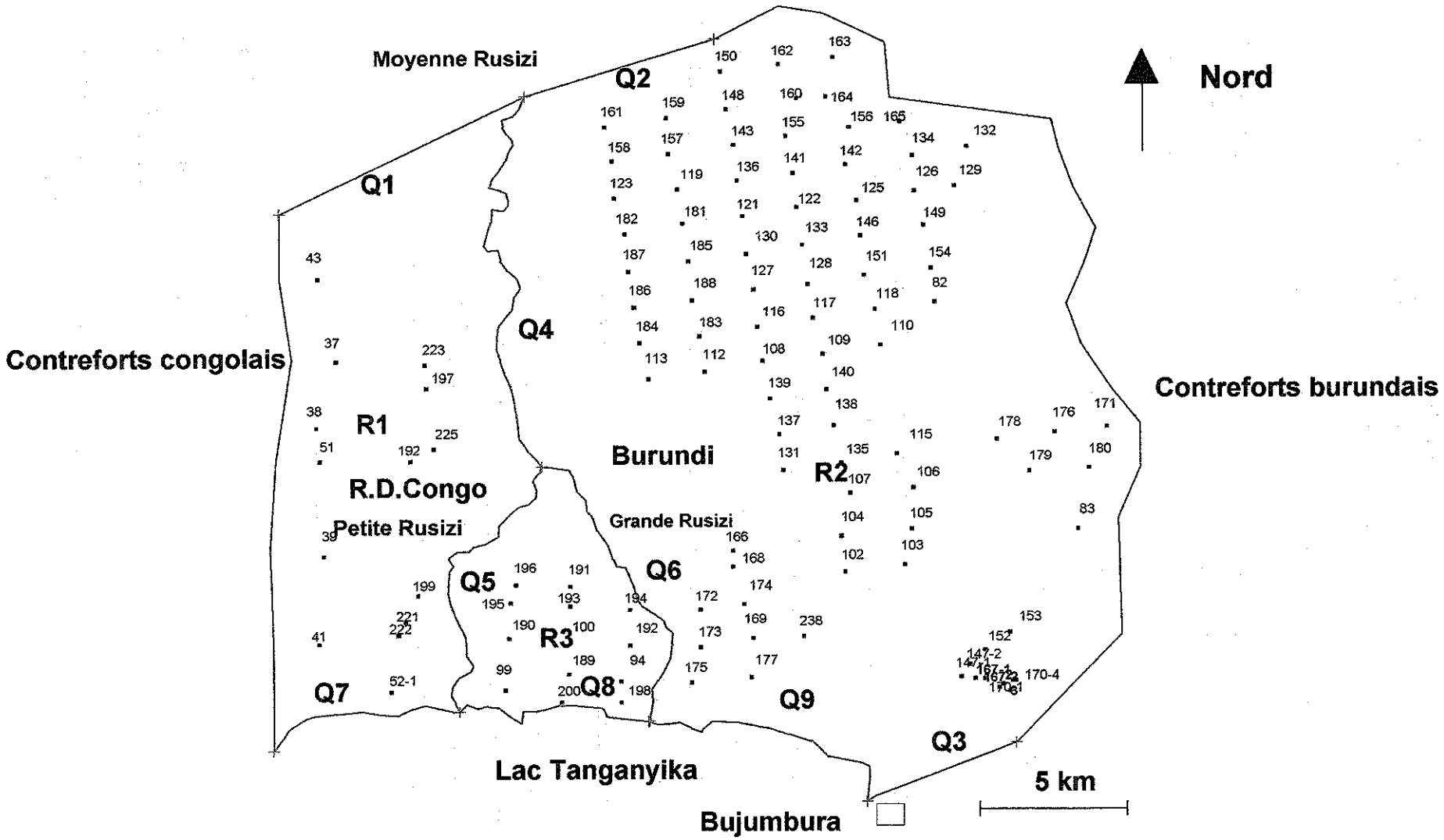


Fig.VIII.13: Débits entrant et débits sortant du modèle

Le débit de la nappe peut être calculé à l'aide de l'expression de Darcy :

$Q = K_m .A . i$

K_m = moyenne arithmétique des coefficients de k mesurés dans les forages encadrant la section ;

A = section de la nappe

i : gradient hydraulique

Cette formule, appliquée aux sections élémentaires entre les forages Ru 165 et Ru 184 (en passant par Ru 142, 122, 130 et Ru 188) a donné un débit de 0.87 m^3/s, comparable à Q4 (0.58 m^3/s) calculé par le modèle.

L'acquisition de données récentes et la détermination d'autres paramètres hydrodynamiques, (porosité efficace et coefficient d'emmagasinement) permettraient une simulation du modèle en régime transitoire. La réalisation de ce modèle permettrait de suivre l'évolution de la nappe en fonction du temps et de proposer un schéma pour son exploitation.

Des forages plus profonds pourraient mettre en évidence d'autres nappes aquifères qui, ensemble avec celle qui vient d'être étudiée, constitueraient une alternative pour l'alimentation en eau de la population et pour l'irrigation d'au moins une partie de la plaine qui accuse un déficit hydrique durant près de 5 mois consécutifs pendant l'année.

IX. Conclusions générales

L'évaluation des potentialités aquifères de la plaine de la Rusizi s'est basée sur plusieurs données géologiques, hydrologiques, hydrométéorologiques et hydrogéologiques recueillies au Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC, Belgique), à l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU), à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) ainsi qu'aux Ministères de l'Energie et des Mines, de l'Agriculture et de l'Elevage.

La réintérprétation de données géologiques et hydrogéologiques a abouti à l'établissement de la géométrie et structure de la nappe aquifère de la Rusizi. L'aquifère, très hétérogène, présente des variations latérales et verticales. Globalement, il s'agit de sable grossier à graveleux dans les dépôts des affluents de la Rusizi, du sable fin dans les dépôts lacustres et du sable moyen à grossier dans les dépôts de cordons littoraux.

La profondeur du toit de la nappe est très variable. Aux limites septentrionale, orientale et occidentale de la basse Rusizi, la nappe aquifère se trouve à plus de 30 m de profondeur. Au bord de la Rusizi du lac Tanganyika, elle se trouve à moins de 10 m, voire moins de 5 m dans certains forages.

Dans les dépôts fluviatiles, le toit et la base de l'aquifère sont constitués par de l'argile sableuse et calcareuse. Dans les dépôts lacustres et cordons littoraux, la base de l'aquifère est constituée par du sable fin argileux.

L'épaisseur de la nappe est très variable : de 0.5 à 3 m dans les dépôts fluviatiles, elle peut dépasser 5 m dans les dépôts lacustres et cordons littoraux.

Les bilans hydrométéorologiques ont montré que la plaine accuse un déficit hydrique durant cinq mois par an (entre mai et septembre). La hauteur moyenne annuelle de l' eau utile varie de 80 mm (basse Rusizi) à 140 mm (moyenne Rusizi). A cause de l'irrégularité des précipitations dans la basse Rusizi, parfois, les années hydrologiques sèches ne fournissent pas d'eau utile..

Le bassin supérieur de la Rusizi constitue en quelque sorte « un château d'eau » : les affluents de la Rusizi prennent source sur la crête Congo-Nil où la pluviométrie est plus élevée, la température modérée par l'altitude et l'évapotranspiration y est réduite.

Les bilans hydrologiques de six bassins orientaux de la Rusizi montrent que la hauteur moyenne annuelle d' « eau utile » est comprise entre 800 mm (Nyakagunda) à 1000 mm (Kaburantwa) soit 42 à 57% de la pluviométrie moyenne annuelle. L'irrégularité des précipitations fait que cette hauteur varie dans de larges limites.

Les années pour lesquelles nous avons pu déterminer les réserves du bassin supérieur montrent que, par rapport aux autres termes du bilan, la variation annuelle du stock d'humidité du sol et des réserves souterraines reste faible.

Le volume de réserves moyennes annuelles des bassins orientaux de la Rusizi est estimé à :

Nyakagunda (82-86) : $4.12\times10^{7}m^{3}$ soit 319 mm
Nyamagana (84-87) : $5.32\times10^{7}m^{3}$ soit 245 mm
Muhira (82-87) : $3.17\times10^{7}m^{3}$ soit 158 mm
Kaburantwa (86-90) : $2.26\times10^{8}m^{3}$ soit 413 mm
Mpanda Gatura (83-86) : $3.04\times10^{7}m^{3}$ soit 127 mm
Mpanda axe D (83-86) : $1.88\times10^{7}m^{3}$ soit 39 mm

Les enregistrements de l'écoulement aux stations limnimétriques ont montré que la lame écoulée n'augmente pas proportionnellement à l'augmentation de l'eau utile calculée. Des déficits d'écoulement élevés sont enregistrés pendant les années pluvieuses. Une partie de ces déficits passe dans les nappes de la plaine au pied des contreforts et par débordement des rivières pendant la saison pluvieuse.

L'interprétation analytique de nombreux essais de pompage a permis de déterminer localement les valeurs des paramètres hydrodynamiques de la nappe (transmissivités et perméabilités). La distribution spatiale de ces paramètres a été esquissée.

Dans la partie congolaise :

- la nappe de dépôts fluviatiles présente des conductivités hydrauliques de l'ordre de 2×10^{-5} à 3.2×10^{-4} m/s ;

- dans les dépôts lacustres (explorées par un seul forage), K = 7.2×10^{-4} m/s

Dans la partie burundaise :

- dans les dépôts fluviatiles, K est comprise entre 1.1×10^{-4} et 2.2×10^{-2} m/s ;
- dans les dépôts lacustres, K est comprise entre 1.1×10^{-4} et 3.4×10^{-3} m/s ;
- dans les dépôts de cordons littoraux, K est comprise entre 9.7×10^{-4} et 8.3×10^{-3} m/s.

Les zones les plus perméables sont localisées dans les dépôts fluviatiles du Nord-Est et Sud-Est , ainsi que dans les cordons littoraux aux abords du lac Tanganyika. Ce sont ces mêmes zones qui sont les plus transmissives.

Le traitement géostatistique appliqué aux conductivités hydrauliques résultant de 69 points de mesure (dans la partie burundaise) donne des variogrammes qui s'ajustent par les fonctions sphérique et exponentielle. L'hétérogénéité observée dans les dépôts fluvio-lacustres est mise en évidence par un effet de pépite égal à 0.4 (en ln K). Une corrélation entre les mesures est observée sur une distance de 4400 m.

Le modèle mathématique a permis d'appréhender les valeurs des conductivités hydrauliques dans les secteurs de la plaine qui n'ont pas été explorés par les forages. Les échanges d'eau entre la nappe et la rivière Rusizi d'une part, et entre la nappe et le lac Tanganyika d'autre part, ont été estimés.

Dans un milieu géologique, « structuralement, stratigraphiquement tectoniquement et sédimentologiquement » aussi complexe, nous n'avons pas la prétention d'avoir épuisé entièrement l'étude hydrogéologique de la plaine de la Rusizi.

Nous proposons ci-dessous des études qui pourraient être menées par les différents services chargés de la gestion de l'eau et de l'environnement, en collaboration avec la Faculté des sciences de l'Université du Burundi.

Le bassin supérieur de la Rusizi étant complexe du point de vue géologique (région très faillée), une étude hydrogéologique s'impose pour délimiter son bassin hydrogéologique. En effet, les réserves importantes du bassin supérieur proviennent vraisemblablement loin de la limite du bassin hydrologique.

Dans la plaine, la prospection géophysique par la méthode électrique permettrait de mieux définir la structure et la géométrie du toit et de la base de l'aquifère. De même, des diagraphies électriques, gamma ray et gamma gamma pourraient apporter des informations complémentaires, respectivement sur la lithologie et la perméabilité des terrains, la teneur en argile, la densité et la porosité des terrains.

Dans notre travail, nous n'avons abordé l'aspect hydrochimique de la nappe de la plaine. L'étude chimique des eaux de la Rusizi et de ses affluents (Gourdin et al. (1986) a montré que les eaux de la Rusizi présentent une salinité élevée. Par contre, les eaux des affluents de la Rusizi présentent un contenu ionique faible. L'interférence qui puisse exister entre la Rusizi et les nappes de la plaine devrait être étudiée.

Des essais de pompage de longue durée et une installation d'un réseau de piézomètres pourraient compléter les informations sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, notamment par la détermination de la porosité et le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

Une étude hydrologique plus détaillée de la Mpanda et des autres petites rivières qui traversent la basse Rusizi, combinée avec un suivi régulier du niveau de la nappe, permettrait de mieux comprendre la recharge et la vidange de la nappe. Cela implique l'installation d'un nombre suffisant de piézomètres autour des forages d'exploitation.

Les conditions de potentiel imposé au niveau de la rivière Rusizi, du lac Tanganyika, entre la basse Rusizi et la moyenne Rusizi ainsi que la surface piézométrique de la nappe aquifère de la basse Rusizi subissent certainement des variations dans le temps.. Il est important de suivre continuellement ces fluctuations afin de caler le modèle mathématique en régime transitoire pour pouvoir l'utiliser pour des fins prévisionnelles. Ce modèle pourrait servir de base aux futurs programmes d'aménagement de la basse Rusizi (extension de la ville de Bujumbura, projets agricoles et industriels....).

Les projets agricoles implantés dans la basse Rusizi utilisent des pesticides et fertilisants dans les cultures de coton et de café. Comme ces produits peuvent constituer une source de contamination des nappes, un suivi régulier du chimisme de la nappe est recommandé.

Enfin, l'extension de la ville de Bujumbura vers la basse Rusizi s'accompagne de la création de nouvelles zones industrielles (industries chimiques, textiles et agro-alimentaires, dépôts pétroliers, infrastructures aéroportuaires...) qui peuvent être source de pollution de la nappe. Afin de pouvoir concilier le développement de la ville et la protection de la nappe, des essais de traçage sont recommandés pour définir les périmètres de protection de la nappe.

Annexe I : Description géologique des forages

Transversale n°1

Ru 150 : cote = 848.70 m , nappe touchée à 36 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale brun noirâtre
de 0.50 à 2 m : argile sableuse, humifère et calcareuse, brun noirâtre
de 2 à 14.30 m : argile sablo-limoneuse calcareuse gris-jaunâtre
de 14.3 à 36 m : argile très sablo-graveleuse, limoneuse, calcareuse jaune grisâtre
de 36 à 37 m : gravier argileux, calcareux jaunâtre avec petits noyaux d'argile
de 37 à 38 m : sable graveleux calcareux jaunâtre
en dessous de 38 m : argile sableuse jaunâtre à grise légèrement stratifiée.

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0 à 38 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 36 et 38 m

Ru 162 : cote = 861 m, nappe touchée à 45.60 m

de 0 à 1 m : terre végétale sablo-argileuse brun noire
de 1 à 23.10 m : argile gris brunâtre calcareuse
de 23.10 à 25 m : argile brune graveleuse calcareuse
de 25 à 40 m : argile gris brun calcareuse
de 40 à 45.6 m : argile jaune calcareuse
de 45.6 à 47 m : argile très sablo graveleuse jaune brun
de 47 à 48.75 m : gravier et sable graveleux grossier jaune
en dessous de 48.75 m : argile sablo graveleuse brun jaune

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 48.75 m : alluvions récentes
nappe comprise 47 et 48.75 m

Ru 163 : cote = 862.40 m, nappe touchée à 17 m

de 0 à 1.30 m : terre végétale sablo-argileux brun noirâtre
de 1.3 à 20 m : argile sablo-graveleuse calcalifère
de 20 à 27 m : mélange de sable très graveleux orange grisâtre et d'argile jaunâtre sableuse
de 27 à 29 m : argile sableuse jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1.30 m : sol
de 1.30 à 29 m : dépôts fluviatiles
nappe comprise entre 20 et 27 m

Transversale n°2

Ru 161 : cote = 827.15 m , nappe touchée à 31 m

de 0 à 1 m : terre végétale sablo-argileuse gris foncé
de 1 à 8 m : argile gris jaunâtre
de 8 à 21 m : sable fin silto-argileux jaunâtre brunâtre.
de 21 à 30.30 m : argile très silto-sableuse jaunâtre avec quelques noyaux argileux
de 30 à 35.65 m : sable grossier graveleux, argileux jaunâtre, en partie induré (ciment ferrugineux, non calcareux)
de 35.65 m à 38 m : sable fin graveleux, micacé jaune légèrement silto argileux avec grains ferrugineux
de 38 à 53 m : sable très fin, silteux jaunâtre
de 53 à 57.45 m : sable gris, tout venant graveleux micacé, mélange de fragments d'argile noire passant à l'argilite
de 57. 45 à 61 m : argilite bien litée, gris noir avec quelques lits psammitiques
de 61 à 61.50 m : sable fin silteux jaune gris
de 61.50 à 62.50 m : argilite grise à noire compacte sablo-graveleux
de 62.50 à 71 m : sable tout venant graveleux micacé, gris foncé, feldspathique
de 71 à 72 m : argile silteuse grise
de 72 à 75.50 m : sable gris, fin à grossier, légèrement graveleux avec quelques noyaux d'argile grise
en dessous de 75.5 m : argile grise, légèrement graveleuse

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 53 m : dépôts fluvio lacustres.
de 53 à 61 m : les dépôts lacustres contiennent des débris de schistes argileux gris à noir avec quelques feuillets psammitiques
de 61 à 75.50 m : dépôts lacustres.

deux nappes aquifères ont été traversées:
de 31 à 35.65 m
de 53 à 57.45 m

Ru 159 : cote = 837 m, nappe aquifère touchée à 38 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse gris brun
de 1 à 3 m : argilite silto-sableuse brun foncé
de 3 à 6 m : sable silto-argileux brun clair
de 6 à 8 m : argile sablo-graveleuse gris clair calcareuse
de 8 à 16 m : sable fin silto-argileux gris beige clair légèrement calcareux
de 16 à 17 m : sable graveleux silto-argileux
de 17 à 34.20 m : argile sablo-graveleuse calcareuse, jaunâtre
de 34.0 à 52.65 m : sable fin à très fin , légèrement silto-argileux, jaunâtre micacé
en dessous de 52.65 m : argile gris brun foncé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 52.65m : formations lacustres sablo- argileuses
nappe aquifère comprise entre 34 et 52.65 m

Ru 148 : cote : 838.5 m, nappe touchée à 34 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale argilo-sableuse noire, grosse, avec radicelles
de 0.50 m à 3.30 m : argile noire légèrement sableuse, très compacte
de 3.30 m à 17 m : argile sablo-graveleuse et calcareuse gris jaunâtre très compacte
de 17 à 21 m : sable graveleux très argileux
de 21 à 25 m : argile sableuse très calcaire, gris jaunâtre
de 25 m à 29 m : silt grossier légèrement sablo-graveleux et argileux, blanc jaunâtre
de 29 à 34 m : argile très sableuse gris jaunâtre calcareuse, gris jaunâtre
de 34 à 36 m : gravier émoussé, légèrement sablo-argileux et calcareuse, jaunâtre
en dessous de 36 m : argile très sableuse et calcareuse

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 36 m : dépôts lacustres argilo-sableux
nappe aquifère comprise entre 34 et 36 m

Ru 160/2 : cote = 859 m, nappe touchée à 35 m

de 0 à 1 m : terre végétale noire sablo argileuse avec radicelles
de 1 à 6 m : argile très sableuse gris foncé
de 6 à 10 m : sable graveleux et argileux brun jaune clair
de 10 à 28 m : argile sableuse, légèrement graveleuse, gris brun, avec calcaire
de 28 à 32 m : limon sableux, calcareuse, jaune orange, avec ponctuations ferrugineuses rougeâtres
de 32 à 38.50 m : mélange sable et limon, calcareuse, jaunâtre
en dessous de 38.50 m : argile sableuse calcareuse gris jaune

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 38.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 32 et 38.50 m

Ru 164 : cote = 857 m, nappe touchée à 30.20 m

de 0 à 1 m : terre végétale noire sablo-argileuse
de 1 à 2 m : argile noire grosse
de 2 à 32 m : argile sableuse et calcareuse brun jaune foncé à claire
de 32 à 34.50 m : sable graveleux jaune orange grisâtre, tout venant avec cailloux de quartz

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 34.50 m : alluvions récentes
nappe située entre 32 et 34.50 m

Transversale n° 3

Ru 158 : cote = 827.75 m, nappe touchée à 33 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale sableuse, brun gris
de 0.50 à 5.20 m : argile très sableuse, jaune brune, calcareuse
de 5.2 à 9 m : silt grossier très sableux jaune foncé calcareuse
de 9 à 29 m : argile silto-sableuse légèrement calcareuse, gris jaune
de 29 à 31 m : sable quartzeux fin à grossier, jaunâtre anguleux
de 31 à 33 m : argile blanc jaunâtre avec éléments graveleux
de 33 à 34 m : sable tout venant blanc jaunâtre, avec noyaux argileux
de 34 à 37 m : argile très silto-sableuse, jaune
en dessous de 37 m : argile jaune pâle

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.5 à 37 m : dépôts lacustres
nappe aquifère située entre 33 et 34 m

Ru 157 : cote = 831.15 m, nappe touchée à 35 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse gris brun
de 1 à 9 m : argile sableuse gris brun légèrement calcareuse
de 9 à 36.07 m : sable fin à très fin, très argileux, jaune
de 36.07 à 41 m : sable tout venant, feldspathique, graveleux, légèrement calcareuse, jaune
de 41 à 44 m : sable blanc grossier légèrement feldspathique,
de 44 à 46 m : argile légèrement sableuse blanchâtre, micacé
en dessous de 46 m : argile grise compacte

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 46 m : dépôts lacustres sablo-argileux
nappe aquifère située entre 36.07 et 44 m

Ru 143 : cote = 831 m, nappe touchée à 22.13 m

de 0 à 1 m : terre végétale gris foncé avec débris végétaux
de 1 à 2.10 m : sable terreux avec noyaux ferrugineux brun rouge, friable
de 2.1 à 7.20 m : sable fin légèrement graveleux et argileux, brun clair
de 7.2 à 23 m : sable moyen graveleux et légèrement argileux, gris jaunâtre
de 23 à 28 m : sable grossier légèrement graveleux et argileux, gris jaunâtre
de 28 à 31 m : sable fin, blanc, légèrement graveleux
de 31 à 36.10 m : limon (silt) jaunâtre grossier, non argileux
de 36.10 m à 38.27 m : sable grossier légèrement graveleux et argileux, avec noyaux calcaires, jaunâtre pâle

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 m à 38.27 m : dépôts lacustres
nappe aquifère : entre 23 et 28 m

Ru 155 : cote = 843.55 m, nappe touchée à 38 m

de 0 à 1 m : terre végétale noire sablo-argileuse
de 1 à 3.20 m : argile sableuse noirâtre à gris jaunâtre, calcareuse
de 3.20 m à 11 m : argile très sableuse gris jaune, calcareuse
de 11 à 23 m : argile très sableuse avec gravier quartzeux et feldspathique
de 23 à 25.20 m : argile légèrement sablo-graveleuse, calcareuse, gris noirâtre
de 25.20 m à 30 m : argile silto-sableuse calcareuse, jaune brunâtre
de 30 à 34 m : sable graveleux silto-argileux, calcareux jaune brun
de 34 à 38 m : silt argilo-sableux calcareux jaune pâle
de 38 à 39 m : sable grossier calcareux, silto-argileux jaunâtre
de 39 à 39.95 m : sable fin à très fin, silto-argileux calcareux, jaunâtre
en dessous de 39.95 m : argile gris moyen, légèrement sableuse, calcareuse

Interprétation
de 0 à 1 m : sol
de 1 à 39.95 m : dépôts fluviatiles sablo argileux
nappe aquifère située entre 30 et 34 m

Ru 156 : cote = 841.65 m, nappe touchée à 30 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse, fine noire
de 1 à 23 m : argile sableuse gris jaunâtre, sablo-graveleuse à partir de 18m
de 23 à 30 m : silt sablo-graveleux argileux très calcareux, jaunâtre
de 30 à 34 m : sable graveleux avec cailloux orange pâle
de 34 m à 41 m : argile sablo-graveleux gris jaunâtre

Interprétation
de 0 à 1 m : sol
de 1 à 41 m : dépôts fluviatiles
nappe aquifère comprise entre 30 et 34 m

Ru 165 : cote = 846.25 m, nappe touchée à 28 m

de 0 à 1 m : terre superficielle sableuse gris brun foncé
de 1 à 2 m : sable moyen argileux, brun
de 2 à 18 m : argile sableuse , calcareuse brun jaunâtre
de 18 à 19 m : argile sableuse, blanchâtre, très calcareuse
de 19 à 29.10 m : argile sableuse calcareuse, jaune grisâtre
de 29.10 m à 31 m : concrétions sablo-calcareuse blanchâtres à jaunâtres
de 31 à 31.80 m : arène de gneiss à biotite blanchâtre à orange

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 2 à 31.80 m : dépôts fluviatiles
nappe aquifère comprise entre 29.10 et 31 m

Transversale n°4

Ru 123 : cote = 827.75 m, nappe touchée à 33 m

de 0 à 1 m : terre grise sableuse, micacé et humifère
de 1 à 4.15 m : argile grise jaunâtre, légèrement sableuse et calcareuse
de 4.15 à 17 m : argile jaune, légèrement sableuse, calcareuse et micacé
de 17 à 26.15 m : sable fin, jaune grise, argileux, micacé, calcareux
de 26.15 à 30 m : sable blanc moyen à grossier contenant mica et tourmaline
de 30 à 35.20 m : sable moyen à fin, gris jaunâtre, l argileux et micacé
de 35.20 à 43 m : sable fin, jaune blanche, avec gravier fin roulé , concrétions ferrugineuses, peu argileux
de 43 à 48 m : sable fin gris, très argileux et micacé
de 48 à 49.45 m : argile gris foncé, légèrement sableuse, très micacé

Interprétation
de 0 à 1 m : sol
de 2 à 49.45 m : dépôts lacustres sablo-argileux
nappe aquifère comprise entre 30 et 35.20 m

Ru 119 : cote = 828.50 m, nappe touchée à 30.20 m

de 0 à 1 m : sable fin terreux, renfermant des matières humiques, du mica et du travertin calcaire
de 1 à 6 m : argile brun clair, légèrement sableuse et calcareuse
de 6 à 12.10 m : argile grise, très calcareuse, renfermant des grains blancs de travertin calcaire et un peu de mica en fines paillettes
de 12.10 à 18 m : argile sableuse et graveleuse, légèrement calcareuse
de 18 à 23 m : sable fin ,jaune, légèrement sableuse, micacé et calcareuse
de 23 à 24 m : argile jaune, légèrement sableuse et calcareuse, micacé
de 24 à 33.10 m : sable jaune fin, argileux à très argileux
de 33.10 à 37 m : argile grise, micacé, légèrement sableuse et calcareuse
de 37 à 38.66 m : sable très fin, jaune à gris, argileux, calcareux et micacé
en dessous de 38.66 m : argile claire

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 38.66 m : dépôts lacustres sablo argileux
nappe aquifère comprise entre 30 et 33.10 m

Ru 136 : cote = 828.80 m, nappe touchée à 30 m

de 0 à 1 m : terre noire argileuse, sableuse, micacé et très humifère
de 1 à 3 m : argile noire, légèrement calcareuse, sableuse et micacé
de 3 à 23.15 m : argile grise, légèrement sableuse, calcareuse et micacé
de 23 à 30 m : sable fin jaune, légèrement argileux, très micacé
de 30 à 32 m : sable fin à moyen, jaune blanchâtre, micacé
de 32 à 35.68 m : sable très fin, jaune clair, légèrement argileux, très micacé
en dessous de 35.68 m : argile jaune clair, micacé et très calcareuse

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 35.68 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 30 et 32 m

Ru 141 : cote = 833.35 m, nappe touchée à 24 m

de 0 à 0.50 m : terre noire très argileuse, micacé et humifère
de 0.50 à 4.10 m : argile gris foncé calcareuse
de 4.10 m à 24 m : argile grise, sableuse, renfermant du mica et des grains blancs de travertin en abondance
de 24 à 30 m : sable moyen à grossier, gris jaunâtre légèrement argileux et micacé, renfermant des grains de quartz et de la tourmaline
de 30 à 31 m : argile grise, légèrement sableuse et micacé

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 31 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 24 et 30 m

Ru 142 : cote = 832.60 m, nappe touchée à 19 m

de 0 à 0.50 m : terre gris noir, très sableuse, légèrement micacé et humifère
de 0.50 à 16 m : argile gris clair, sableuse, légèrement micacé et calcareuse
de 16 à 19 m : sable fin, gris clair, argileux et micacé
de 19 à 21 m : sable grossier, légèrement argileux, renfermant du mica, des concrétions calcaires et ferrugineuses
en dessous de 21 m : argile grise, légèrement sableuse, renfermant du mica, des concrétions calcaires et ferrugineuses

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 21 m : alluvions récentes
nappe aquifère : entre19 et 21 m

Ru 134 : cote = 839 m nappe touchée à 27 m

de 0 à 0.50 m : terre grise sableuse et très humifère
de 0.50 à 5.37 m : argile grise jaune, légèrement sableuse et calcareuse
de 5.37 à 7 m : sable fin très argileux, micacé et calcareux
de 7 à 12 m : argile jaune sableuse et micacé, calcareux
de 12 à 20 m : sable grossier, jaune, argileux, micacé et calcareux
de 20 à 26 m : argile allant du jaune au gris sableuse et micacé
de 26 à 27 m : argile grise compacte, légèrement sableuse et micacé
de 27 à 28.70 m : sable fin à moyen, légèrement argileux et micacé
de 29 à 31 m : argile jaune légèrement verdâtre, très micacé

de 31 à 32 m : argile plastique gris verdâtre à gris noirâtre très micacé

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 32 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 27 et 28.70 m

Ru 132 : cote = 837 m, nappe touchée à 9 m

de 0 à 0.50 m : terre grise humifère, sableuse et micacée
de 0.50 à 3 m : argile gris foncé, légèrement micacé
de 3 à 9 m : argile brun jaune, sableuse et graveleuse, micacé
de 9 à 11 m : gravier fin roulé, quartzeux et feldspathique, renfermant du sable grossier, légèrement argileux, du mica et de la tourmaline
de 11 à 12 m : sable grossier, jaune légèrement argileux et micacé
de 12 à 13.50 m : gravier fin roulé, quartzeux et feldspathique, renfermant du sable grossier légèrement argileux, du mica et de la tourmaline
de 13.50 à 14.37 m : argile gris jaune sableuse et micacé

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0 à 14.37m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 9 et 13.50 m

Transversale n°5

Ru 121/1 : cote = 825 m, nappe touchée à 19.15 et 51.40 m

de 0 à 0.50 m : terre noire sableuse renfermant des matières humiques et du mica
de 0.50 à 2.20 m : argile brun foncé, sableuse et micacée
de 2.20 à 7 m : argile brun jaunâtre sableuse et micacée
de 7 à 20 m : argile grise, sableuse, micacée renfermant du travertin calcaire
de 20 à 25 m : argile gris clair légèrement calcareuse et micacée
de 25 à 27 m : sable fin jaune, argileux renfermant un peu de mica
de 27 à 34 m : sable très fin passant du gris clair au jaune, argileux et micacé
de 34 à 37 m : argile gris jaunâtre micacé
de 37 à 38.16 m : sable fin à grossier, légèrement argileux et micacé
de 38.16 m à 45 m : argile gris jaunâtre, sableuse, renfermant du mica et et de des gains de travertin calcaire
de 45 à 47 m : sable grossier, gris, légèrement argileux mêlé à des grains de de travertin calcaire
de 47 à 49.65 m : argile sableuse, calcareuse avec mica
de 49.65 à 50 m : sable moyen ,gris jaunâtre, argileux mêlé de travertin calcaire
de 50 à 51.40 m : argile gris clair, légèrement sableuse et très calcareuse
de 51.40 à 53.10 m : sable grossier gris jaunâtre renfermant du fin gravier quartzeux, des grains de travertin calcaire et un peu de mica

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 m à 53.10 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 25 et 34 m et en dessous de 51.40 m

Ru 122 : cote = 827 m, nappe touchée à 23 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale noire sableuse avec un peu de mica
de 0.50 à 5.06 m : argile noire à grise, légèrement sableuse et calcareuse avec un peu de mica
de 5.06 à 19 m : argile grise, très sableuse, avec du mica et du travertin
de 19 à 20 m : sable fin argileux, gris clair, refermant du fin gravier et travertin calcaire
de 20 à 23 m : argile gris clair très sableuse, micacé, à travertin calcaire
de 23 à 23.52 m : sable grossier gris jaunâtre, argileux, micacé à travertin calcaire
de 23.52 à 25.10 m : argile sableuse gris claire, micacé et calcareuse

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 25.10 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 23 et 23.52 m

Ru 125 : cote = 830.35 m, nappe touchée à 21 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale grise, sableuse
de 0.50 à 4.20 m : argile grise, peu sableuse, micacée et calcareuse
de 4.20 à 8 m : argile jaune, très sableuse et micacé
de 8 à 21 m : argile grise avec passes jaunâtres sableuses et micacé et calcareuses
de 21 à 21.40 m : sable grossier gris jaune argileux, micacé et calcareux
en dessous de 21.40 m : mélange d'argile gris foncé et de sable grossier

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 21.40 : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 21 et 21.40 m

Ru 126 : cote = 836.30 m, nappe touchée à 28 m

de 0 à 0.50 m : terre grise très sableuse et humifère
de 0.50 à 8.52 m : argile grise sableuse et micacé, parfois calcareuse
de 8.52 à 9 m : sable grossier gris, argileux et micacé
de 9 à 11.40 m : argile grise, sableuse et micacé
de 11.4 à 15 m : sable grossier, jaune, argileux, micacé; avec du gravier fin
de 15 à 21 m : argile jaune grise, très sableuse et très micacée
de 21 à 23 m : argile grise très sableuse, micacée et calcareuse
de 23 à 27.46 m : argile jaune, sableuse, micacée, travertin et gravier fin
de 27.46 à 28 m : sable fin, gris verdâtre, très argileux et très micacé
de 28 à 29 m : sable grossier, jaunâtre, avec du gravier fin quartzeux, grains de micaschistes et de gneiss, tourmaline et mica blanc
en dessous de 29 m : argile jaune sableuse à mica blanc

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 29 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 28 et 29 m

Ru 129 : cote = 833 m, nappe touchée à 19.40 m

de 0 à 0.50 m : terre végétale
de 0.5 à 3.20 m : argile gris noirâtre, peu sableuse
de 3.20 à 6 m : gravier fin jaune, quartzeux, feldspathique, roulé et argileux
de 6 à 7 m : argile gris clair graveleuse
de 7 à 12 m : argile jaune grise légèrement sableuse et micacé
de 12 à 16 m : sable très fin jaune, très argileux, micacé
de 16 à 17 m : argile jaune gris très micacée
de 17 à 19.40 m : argile gris claire avec un peu de gravier
de 19.40 à 20.85 m : gravier fin roulé, quartzeux et feldspathique, sablo-argileux
en dessous de 20.85 m : argile grise sableuse

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 20.85 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 19.40 et 20.85 m

Transversale n°6

Ru 130 : cote = 816.80 m, nappe touchée à 20.30 m

de 0 à 2 m : argile noire humifère
de 2 à 18.20 m : argile gris claire, sableuse, calcareuse et micacée
de 18.30 à 22.20 m : sable fin très argileux calcareux, micacé et quartzeux
de 22.20 à 24.30 m : argile jaune, peu sableuse et calcareuse, très micacé
de 24.30 à 27 m : sable grossier, jaune, très peu argileux avec du gravier
de 27 à 34.80 m : sable très fin, très argileux et très micacé
en dessous de 34.80 m : argile jaune verdâtre

Interprétation

de 0 à 2 m : sol
de 2 à 34.80 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 24.30 m et 27 m

Ru 133 : cote = 821 m, nappe touchée à 15 m

de 0 à 1 m : terre noire humifère, très légèrement sableuse
de 1 à 9.10 m : argile gris foncé à gris claire très calcareuse, micacé
de 9.10 à 11.20 m : sable grossier gris clair argileux, calcareux et micacé
de 11.20 à 15 m : argile grise sableuse, calcareuse et micacé
de 15 à 18 m : sable grossier gris jaunâtre, un peu argileux, micacé à concrétions calcaires
de 18 à 20 m : sable grossier jaunâtre, renfermant du fin gravier de petites concrétions sablo-calcareuses, du mica et de la tourmaline
en dessous de 20 m : argile jaune, légèrement sableuse, calcareuse et micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 20 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 15 et 20 m

Ru 146 : cote = 823.90 m, nappe touchée à 25 m

de 0 à 1 m : terre végétale gris argilo-sableuse à débris végétaux
de 1 à 7 m : argile sableuse, gris foncé à jaunâtre
de 7 à 13 m : sable fin à grossier graveleux, argileux, jaune grisâtre
de 13 à 17 m : sable grossier très graveleux légèrement argileux, jaunâtre
de 17 à 19 m : limon sablo-argileux et graveleux micacé, gris jaunâtre
de 19 à 21 m : sable moyen graveleux et limoneux, argileux, jaune
de 21 à 25.20 m : sable fin, légèrement argileux jaunâtre
de 25.20 à 29.52 m : sable moyen graveleux, légèrement argileux, jaunâtre
en dessous de 29.52 m : limon argileux, légèrement sableux, finement micacé, jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol

de 1 à 29.52 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 25.20 m et 29.52 m

Ru 149 : cote = 831.65 m, nappe touchée à 29 m

de 0 à 1 m	: terre végétale gris noirâtre très sableuse avec radicelles
de 1 à 2 m	: argile gris noirâtre très légèrement sableuse
de 2 à 5 m	: argile gris, très légèrement sableuse et calcareuse
de 5 à 7.15 m	: argile gris jaunâtre, très légèrement sableuse
de 7.15 à 9 m	: sable fin à moyen, moyennement argileux, gris jaunâtre
de 9 à 16 m	: argile très sableuse, graveleuse, micacée ; jaunâtre
de 16 à 18 m	: sable grossier, graveleux très argileux ; jaune
de 18 à 19 m	: argile très sableuse, gris jaunâtre
de 19 à 20 m	: sable graveleux très argileux, gris jaunâtre
de 20 à 21 m	: argile très sableuse gris jaunâtre
de 21 à 26 m	: sable graveleux argileux, gris jaunâtre
de 26 à 27 m	: argile grosse très légèrement sableuse, gris jaunâtre
de 27 m à 32.10 m	: sable fin argileux jaune
de 32.10 à 34.25 m	: sable non classé très graveleux, argileux, jaunâtre
de 34.25 à 35 m	: sable fin légèrement graveleux ,argileux, jaunâtre
de 35 à 38.75 m	: sable moyen à grossier, jaunâtre

en dessous de 38.75 m : argile silto-sableuse blanc jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 38.75 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 32.10 et 38.75 m

Transversale n°7

Ru 127 : cote = 811.10 m, nappe touchée à 25.20 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse, très humifère
de 1 à 10.10 m : argile grise noire jaune, calcareuse, micacée
de 10.10 à 13 m : sable grossier gris, très argileux
de 13 à 25.20 m : argile gris verdâtre, légèrement sableuse, micacée et calcareux
de 25.20 à 30.20 m : sable très fin, gris vert, très argileux et micacée
de 30.20 à 34.20 m : sable très fin, jaune; très argileux et micacé
de 34.20 à 38. 20 m : argile jaune grise, sableuse, micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 38.20 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 25.20 et 34.20 m

Ru 128 : cote = 813.55 m, nappe touchée à 15.20 m

de 0 à 1 m : terre noire sableuse, très humifère, peu micacé
de 1 à 15.20 m : argile gris clair, sableuse, calcareuse et micacé
de 15.20 à 19.20 m : sable moyen, gris calcareux, puis fin jaune, argileux et très micacé
en dessous de 19.2 m : argile jaune légèrement sableuse

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 19.20 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 15.20 m et 19.20 m

Ru 151 : cote = 823.80 m, nappe touchée à 25 m

de 0 à 1 m : terre végétale noire, sableuse, avec débris végétaux
de 1 à 6.10 m : argile sableuse grise, calcareuse
de 6.10 à 8.05 m : sable non classé légèrement graveleux feldspathique, argileux, grisâtre
de 8.05 à 15 m : argile sableuse micacé grise avec trace calcaire
de 15 à 21.15 m : sols sablo-argileux gris clair légèrement calcaire
de 21.15 à 23 m : sable graveleux feldspathique silto-argileux, jaunâtre
de 23 à 34.25 m : silt sablo-argileux jaunâtre
de 34.25 à 37.50 m : sable graveleux et feldspathique très silteux et argileux, jaunâtre
en dessous de 37.50 m : argile sableuse jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 37.50 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 25 et 37.50 m

Ru 154/2 : cote = 825.62 m, nappes touchées à 19 et 35 m

de 0 à 1 m : terre végétale noir noire sableuse
de 1 à 4 m : argile noire très sableuse
de 4 à 15.15 m : argile sableuse gris jaunâtre
de 15.15 à 19 m : sable fin à très gros, légèrement graveleux et argileux, jaunâtre
de 19 à 22.25 m : sable moyen à grossier jaunâtre
de 22.25 à 26 m : sable moyen à très fin, silteux, légèrement argileux, avec abondance de très fines paillettes de mica
de 26 à 27 m : sable moyen fin à moyen , blanc jaunâtre
de 27 à 28.15 m : sable graveleux feldspathique tout venant jaune grisâtre silto-argileux
de 28.15 à 31.20 m : argile sablo-graveleuse feldspathique, gris verdâtre
de 31.20 à 37 m : sable fin à moyen gris jaunâtre, silto-argileux
de 37 à 39.10 m : sable non classé très gros à fin, très silto-argileux, gris clair jaunâtre
en dessous de 39.10 m : argile sablo-silteuse, calcareuse, gris clair jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 39.10 m : alluvions récentes
deux nappes aquifères ont été traversées :
entre 19 et 22.25 m
entre 35 et 39.10 m

Transversale n° 8

Ru 116 : cote = 808.80 m, nappe touchée à 16.30 m

de 0 à 1 m : terre végétale humifère
de 1 à 5 m : argile noire avec grains de travertin
de 5 à 16.30 m : sable fin, gris très argileux, et des grains de travertin
de 16.30 m à 18 m : sable fin jaunâtre, micacé
de 18 à 19 m : sable moyen micacé, peu argileux
de 19 à 23.45 m : sable très fin et très argileux
en dessous de 23.45 m: argile panachée de vert

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 23.45 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 16.30 et 19 m

Ru 117 : cote = 812.40 m, nappe touchée à 14 m

de 0 à 1 m : terre végétale
de 1 à 6 m : argile gris foncé très calcareuse avec travertin et mica blanc
de 6 à 14 m : sable moyen, puis grossier, gris jaunâtre argileux
de 14 à 18 m : gravier et sable graveleux, jaunâtre, micacé parfois à tourmaline
de 18 à 25.50 m : sable fin ,blanchâtre, argileux
de 25.5 à 28.10 m : sable très fin, gris clair, très argileux et micacé
en dessous de 28.10 m : argile gris jaune, sableux et micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 28.10 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 14 et 18 m

Ru 118 : cote = 819.90 m, nappe touchée à 17 m

de 0 à 1 m : terre végétale, grise sableuse, humifère, peu de mica
de 1 à 12.10 m : argile gris foncé à clair, sableuse, micacé et calcareux
de 12.10 à 17 m : argile gris clair légèrement sableuse, micacé et calcareux
de 17 à 21.20 m : sable fin à grossier jaunâtre gris, argileux et micacé
de 21.2 à 22.20 m : argile allant du gris jaune au gris, légèrement sableuse

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 22.20 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 17 et 21.20 m

Transversale n°9

Ru 113 : cote = 799.80 m, nappe touchée à 26.05 m

de 0 à 1 m : terre noire sableuse, calcareuse avec matières humiques
de 1 à 25 m : sable fin gris à jaune verdâtre, argileux, micacé et calcareux
de 25 à 26.05 m : argile gris clair, sableuse, très calcareuse et micacé
de 26.05 à 28.15 m : sable fin gris clair légèrement verdâtre calcareux, très argileux et micacé renfermant des débris de coquillages
de 28.15 à 33.15 m : sable fin gris verdâtre, argileux, calcareux et micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 33.15 m : dépôts fluvio-lacustres
nappe aquifère comprise entre 26.05 et 28.15 m

Ru 109 : cote = 809 m, nappes touchées à 11.50 et 74.20 m

de 0 à 1 m : terre noire sableuse, très humifère, renfermant du travertin calcaire et du mica
de 1 à 7 m : argile noire à gris clair, sableuse, calcareuse et micacée
de 7 à 21 m : sable très fin, gris clair à gris jaunâtre, très argileux, micacé et calcareux
de 21 à 29 m : argile allant du jaune brun au jaune vert, sableuse et micacé
de 29 à 36.25 m : sable fin jaune verdâtre, argileux et micacé
de 36.25 à 41.25 m : sable fin à moyen, jaune clair, micacé
de 41.25 à 43.20 m : sable fin blanc jaunâtre, argileux et micacé
de 43.20 m à 46.10 m : sable moyen blanc micacé
de 46.10 m à 46.60 m : argile vert foncé, très dure, micacé (presque du schiste)
de 46.60 à 49.60 m : argile blanche légèrement sableuse, très calcareuse
de 49.60 à 58.35 m : sable fin blanc grisâtre, très micacé
de 58.35 à 61.15 m : argile grise sableuse et micacé
de 61.15 à 63.25 m : sable grossier, gris micacé
de 63.25 à 73.55 m : argile grise, sableuse, micacée et calcareuse
de 73.55 à 74.20 m : sable fin gris, argileux et très micacé
de 74.20 à 75.95 m : sable grossier, gris clair avec mica blanc
en dessous de 75.95 m : argile gris-verdâtre, sableuse, micacé, calcareux

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 75.95 m : alluvions récentes
deux nappes aquifères ont été traversées:
entre 7 et 21 m
entre 74.20 et 75.95 m

Ru 110 : cote = 816.15 m, nappe touchée à 22.15 m

de 0 à 1 m : terre noire sableuse humifère
de 1 à 8 m : argile grise, sableuse, calcareuse et micacé
de 8 à 18 m : sable fin gris clair, argileux et micacé
de 18 à 20 m : sable très fin, jaune, argileux et très micacé
de 20 à 22.15 m : argile jaune verdâtre, sableuse et micacée
de 22.15 à 29.09 m : sable fin à moyen, jaune micacé
en dessous de 29.09 m : argile jaune verdâtre, légèrement sableuse, micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 29.09 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 22.15 et 29.09 m

Transversale n° 10

Ru 139 : cote = 804.40 m, nappe touchée à 18 m

de 0 à 1 m : terre végétale noirâtre sableuse ,avec radicelles
de 1 à 6 m : argile sableuse gris noirâtre, micacé
de 6 à 9 m : sable fin micacé, argileux, gris jaunâtre
de 9 à 11 m : sable moyen, très légèrement argileux, gris jaunâtre
de 11 à 18 m : sable fin, micacé, très légèrement argileux, jaunâtre
de 18 à 23 m : sable fin, légèrement argileux, trace de calcaire et d'hématite
de 23 à 35.64 m : sable fin, très légèrement argileux, jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1m : sol
de 1 à 35.64 m : alluvions fluvio-lacustres
nappe aquifères comprise entre 18 et 35.64 m

Ru 140 : Cote = 805.75 m, nappe touchée à 11.60 m

de 0 à 1 m : sable gris terreux
de 1 à 6 m : argile grise, sableuse et calcareuse, avec grains blancs de travertin calcaire
de 6 à 14 m : sable fin très argileux, gris jaunâtre
de 14 à 15 m : sable grossier à fin, gris clair, légèrement argileux, avec renfermant de gros éléments de quartz roulé
de 15 à 25 m : limon gris verdâtre, légèrement sableux
de 25 à 31.75 m : argile gris vert micacée

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 31.75 m : alluvions fluvio-lacustres
nappe aquifère comprise entre 14 et 15 m

Transversale n° 11

Ru 137 : cote = 801.15 m, nappe touchée à 27 m

de 0 à 1 m : sable fin quartzeux, coloré par les matières humiques, renfermant du mica et de la tourmaline
de 1 à 4 m : sable moyen ,rosé, quartzeux avec du mica et de la tourmaline
de 4 à 6 m : sable grossier, brun rougeâtre, très légèrement argileux, renfermant du gravier fin, du mica et de la tourmaline
de 6 à 8 m : sable très fin jaune, très argileux et micacé
de 8 à 13 m : limon gris verdâtre à gris, micacé
de 13 à 26.40 m : limon jaune, micacé
de 26.40 à 27 m :argile jaune, micacé
de 27 à 31.70 m : limon jaune, très micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 31.70 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 27 et 31.7 m

Ru 138 : cote = 806.95 m, nappe touchée à 20 m

de 0 à 1 m : sable moyen terreux, humifère, renfermant du mica
de 1 à 5 m : sable moyen à grossier argileux, mica et tourmaline
de 5 à 20 m : limon jaune micacé
de 20 à 30 m : sable très fin, argileux et très micacé
de 30 à 36 m : limon jaune verdâtre, très micacé
de 36 à 36.50 m : argile brun jaune micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 36.50 m : dépôts fluviatiles
nappe aquifère comprise entre 20 et 30 m

Transversale n°12

Ru 131: cote = 799.45 m, nappes touchées à 15 m

de 0 à 1 m : terre sableuse fine
de 1 à 5 m : sable grossier à moyen, brun jaune, quartzeux, avec mica et de la tourmaline
de 5 à 6 m : argile très sableuse, brune jaune, très micacé
de 6 à 17 m : limon légèrement sableux jaune verdâtre
de 17 à 19 m : sable très fin, très argileux, micacé, jaune
de 19 à 36 m : limon grisâtre légèrement sableux et très micacé
de 36 à 37 m : argile très micacée gris verdâtre
de 37 à 41.30 m : limon gris jaune très micacé, légèrement sableux
de 41.30 à 51 m : argile jaune rougeâtre, très micacée
de 51 à 52.50 m : argile gris jaune verdâtre, sableuse et graveleuse, avec des concrétions silico-calcareuses
de 52.50 à 53 m : sable grossier, légèrement argileux
de 53 à 55 m : limon faiblement sableux, très micacé, avec de la calcédoine

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 55 m : alluvions fluvio-lacustres
nappe aquifère comprise entre 17 et 19 m

Ru 135 : cote = 803.75 m, nappe touchée à 19 m

de 0 à 1 m : terre grise, sableuse, très humifère avec mica
de 1 à 4 m : argile grise légèrement jaunâtre, sableuse et calcareuse
de 4 à 5 m : mélange de sable grossier et de gravier fin jaune, quartzeux et feldspathique, légèrement argileux, micacé
de 5 à 8 m : argile jaune très sableuse, très micacé
de 8 à 10 m : limon jaune-verdâtre, très micacé
de 10 à 24 m : limon brun, très micacé
de 24 à 29.34 m : limon gris vert, très micacé
en dessous de 29.34 m : argile grise panachée de jaune, micacée

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 29.34 m : alluvions récentes
nappe dans le limon, entre 19 et 29.34 m

Ru 115 : cote = 803 m, nappe touchée à 15.56 m

de 0 à 1 m : terre noire sableuse avec renfermant des matières humiques
de 1 à 8.26 m : argile gris foncé à gris verdâtre, sableuse et micacée
de 8.26 à 15.56 m : sable fin gris verdâtre, très argileux et très micacé
de 15.56 à 16 m : sable moyen gris verdâtre argileux et micacé, calcareux
de 16 à 20 m : sable fin, gris verdâtre , très argileux et très micacé
de 20 à 21.40 m : argile jaune verdâtre, sableuse et micacée

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 21.40 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 15.56 et 20 m

Transversale n° 13

Ru 107 : cote = 793.5 m, nappe touchée à 21 m

de 0 à 0.50 m : terre grise sableuse renfermant des matières humiques
de 0.50 à 3 m : argile gris clair avec tâches brunes
de 3 à 7.50 m : sable moyen à grossier, blanc jaunâtre, argileux et micacé
de 7.50 à 21 m : sable très fin, gris à jaune verdâtre, argileux et micacé
de 21 à 22 m : mélange d'argile verte et de sable très fin jaune, micacé renfermant des concrétions calcaires
de 22 à 25 m : sable fin jaune, légèrement verdâtre , micacé, argileux, avec des concrétions calcaires
de 25 à 29 m : mélange de sable très fin et d'argile verte micacée
de 29 à 32 m : argile panachée de brun et de vert, sableuse et micacée

Interprétation

de 0 à 0.5 m : sol
de 0.50 à 32 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 22 et 29 m

Ru 106 : cote = 802.2 m, nappe touchée à 21 m

de 0 à 1 m : sable moyen, humifère quartzeux, renfermant du mica
de 1 à 5 m : sable moyen à grossier, rosé à brun, argileux avec du mica
de 5 à 7.03 m : argile sableuse, jaune verdâtre, micacée et concrétions calcaires
de 7.03 à 7.80 m : sable très grossier, jaunâtre argileux avec mica
de 7.80 à 10 m : sable fin, jaune, légèrement argileux et micacé, renfermant des concrétions calcaires
de 10 à 18.05 m : sable très fin, jaune, argileux et micacée
de 18.05 à 21 m : argile jaune verdâtre, sableuse et micacée
de 21 à 25.50 m : sable jaune-verdâtre, moyen à grossier, micacé
en dessous de 25.50 m : argile verdâtre, très micacée

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 25.50 m : dépôts fluvio-lacustres
nappe aquifère comprise entre 21 et 25 m

Transversale n° 14

Ru 166 : cote = 787 m, nappe touchée à 13 m

de 0 à 1 m : terre végétale grasse, gris brun foncé
de 1 à 4 m : argile sableuse brun jaune avec tâches noirâtres
de 4 à 6 m : sable tout venant argileux, jaune blanchâtre, feldspathique
de 6 à 8 m : argile gris brun foncé
de 8 à 11 m : sable tout venant, argileux gris brun micacé, feldspathique
de 11 à 13 m : argile silto sableuse gris pâle, micacée
de 13 à 14.80 m : sable grossier graveleux, feldspathique gris jaune, argileux
en dessous de 14.80 m : argile sableuse feldspathique, brun noirâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 14.80 m : alluvions fluvio-lacustres
nappe aquifère comprise entre 13 et 14.80 m

Ru 168 : cote = 785 m, nappe touchée à 13 m

de 0 à 1.20 m : terre végétale gris brun sablo silteuse
de 1.20 à 5.15 m : argile sableuse brun-jaune clair
de 5.15 à 6 m : argile noire(grasse) à gris brun foncé, sableuse
de 6 à 13 m : argile gris brun foncé, sableuse
de 13 à 14 m : sable grossier argileux gris jaune clair
de 14 à 15.30 m : argile brun noirâtre
de 15.30 à 18 m : sable grossier propre, blanc jaunâtre (feldspathique, légèrement graveleux)
de 18 à 21 m : sable grossier gris clair, légèrement micacé
de 21 à 24 m : sable fin à moyen, gris clair, légèrement micacé
de 24 à 26 m : sable fin à grossier, gris clair, légèrement micacé

Interprétation

de 0 à 1.20 m : sol
de 1.20 à 26 m : formations fluvio-lacustres
nappe comprise entre 15.30 et 21 m

Ru 104 : cote = 789 m, nappes touchées à 18.80 et 38.80 m

de 0 à 0.70 m : argile grise sableuse, humifère et micacée
de 0.70 à 1.40 m : argile gris brun, très sableuse et micacée
de 1.40 à 2.80 m : sable fin, jaunâtre argileuse, micacé avec tourmaline
de 2.80 à 3.30 m : sable grossier, jaunâtre, quartzeux, renfermant du gravier fin, du mica, de la tourmaline et de la magnétite
de 3.30 à 4.30 m : sable grossier jaunâtre, argileux ,micacé à tourmaline
de 4.30 à 5.80 m : sable fin à moyen, blanchâtre, argileux, micacé, à tourmaline
de 5.80 à 6.30 m : sable grossier, blanc, micacé à tourmaline et zircon
de 6.30 à 10.80 m : sable grossier, jaunâtre, légèrement argileux, avec mica, tourmaline, zircon et mélangé à du fin gravier
de 10.80 à 21.80 m : sable fin verdâtre à jaunâtre, argileux micacé, à biotite et tourmaline
de 21.80 à 38.80 m : argile gris verdâtre, micacée
de 38.80 à 43.80 m : argile verdâtre micacée très sableuse
de 43.80 à 44.80 m : sable grossier, verdâtre, argileux et micacé
de 44.80 à 45.80 m : argile verte, légèrement argileux et micacée
de 45.80 à 46.80 m : concrétions vertes sableuses, micacées et carbonatées
en dessous de 46.80 m : argile verte, légèrement sableuses, micacées et carbonatées

Interprétation

de 0 à 0.70 m : sol
de 0.70 à 46.80 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 18.80 m et 21.80 m

Ru 105 : cote = 796 m, nappe touchée à 28 m

de 0 à 1 m : sable moyen brun, terreux avec matières humiques
de 1 à 4 m : sable moyen rosé, très quartzeux, avec mica et tourmaline
de 4 à 6 m : sable grossier, brun clair, légèrement argileux, mica et tourmaline.
de 6 à 8 m : sable fin à moyen, argileux, avec mica et tourmaline
de 8 à 12.50 m : sable très fin, gris jaunâtre, argileux et micacé, renfermant des cailloux calcaires
de 12.50 à 13 m : sable moyen à grossier, jaune, argileux, mêlé à des fragments de calcaire et à des grains ferrugineux
de 13 à 20.80 m : sable très fin, jaune verdâtre, très argileux et micacé
de 20.80 à 24 m : argile gris verdâtre, sableuse et micacé
de 24 à 28 m : sable très fin, jaune à gris-verdâtre, très argileux et micacé
de 28 à 29.70 m : sable moyen, blanchâtre, très quartzeux, mêlé d'un peu de mica, de tourmaline et de gravier fin
de 29.70 à 30.60 m : sable moyen à grossier, gris verdâtre, renfermant du gravier roulé, de mica et de la tourmaline
de 30.60 à 32.80 m : argile gris verdâtre, graveleuse, sableuse et micacé
de 32.80 à 33.34 m : sable fin verdâtre avec de petits cailloux quartzeux, argileux et micacé
de 33.34 à 34.78 m : argile verdâtre jaunâtre, sableuse et micacée
de 34.78 à 36.50 m : sable fin à très fin, jaune, argileux et micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 36.50 m : formations fluvio-lacustres
nappe comprise entre 28 et 30.60 m

Transversale n°15

Ru 172 : cote = 779 m nappes touchée à 8 m

de 0 à 1.10 m : argile grise, sableuse et micacé, renfermant des radicelles
de 1.10 à 2.20 m : argile grise, très sableuse et micacée
de 2.20 à 3.30 m : sable grossier à fin, gris, légèrement argileux et micacé
de 3.30 à 5 m : argile grise, sableuse et micacée
de 5 à 7 m : sable fin à moyen gris clair, argileux et micacé
de 7 à 8 m : argile gris foncé, très compacte, sableuse et micacé
de 8 à 10 m : sable fin à grossier gris argileux, micacé, avec gravier fin
de 10 à 11 m : argile blanche enrobant des noyaux durs de calcédoine
de 11 à 15 m : sable moyen à grossier, quartzeux, avec un peu de mica
de 15 à 17 m : sable fin à grossier, gris, micacé
de 17 à 22 m : sable fin, gris clair, micacé
de 22 à 23 m : sable fin gris foncé, légèrement argileux et micacé
de 23 à 29 m : sable très fin, gris clair, micacé
de 29 à 32 m : sable très fin, gris, légèrement argileux et micacé

Interprétation

de 0 à 1.10 m : sol
de 1.10 à 32 m : formations fluvio-lacustres
nappe aquifère comprises entre: 14 et 17 m

Ru 174 : cote = 779 m, nappe touchée à 12 m

de 0 à 1 m : sable fin argileux, humifère, renfermant quelques radicelles
de 1 à 4.10 m : argile grise sableuse et micacée
de 4.10 à 9.10 m : sable gris moyen, argileux et micacé
de 9.10 à 10.30 m : sable fin gris clair, argileux et micacé
de 10.30 à 12 m : sable moyen gris clair argileux et micacé
de 12 à 13 m : sable fin gris clair, argileux et micacé, avec du gravier fin
de 13 à 17 m : sable grossier gris foncé, micacé
de 17 à 18 m : sable moyen, gris clair, très micacé
de 18 à 23.87 m : sable fin, gris clair

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 23.87 m : formations fluvio lacustres
nappe aquifère comprise entre 13 et 18 m

Ru 102 : cote = 786 m, nappes touchées à 1.98 m et 18.70 m

de 0 à 1.23 m : argile gris foncé, peu sableuse, avec matières humiques
de 1.23 m à 3.33 m : argile gris jaunâtre, sableuse, peu micacée, humifère
de 3.33 à 4.73 m : sable grossier, gris jaunâtre, argileux et micacé
de 4.73 à 11.03 m : sable moyen gris jaunâtre, argileux et micacé, renfermant des gains assez gros
de 11.03 à 11.73 m : sable fin, gris jaunâtre, très argileux et très micacé
de 11.73 à 12.43 m : sable fin à moyen, gris clair, argileux et micacé
de 12.43 à 13.13 m : sable grossier, gris clair quartzeux, avec mica
de 13.13 à 15.23 m : sable fin à grossier, blanc jaunâtre, quartzeux, micacé
de 15.23 à 16.63 m : sable fin à grossier, gris jaunâtre, quartzeux, micacé
de 16.63 à 18.73 m : argile gris foncé, micacé, compacte.
de 18.73 à 20.83 m : sable très fin,, peu argileux, très micacé
de 20.83 à 22.23 m : sable moyen, gris, argileux, micacé
en dessous de 22.23 m : sable fin, gris foncé, très argileux et micacé

Interprétation

de 0 à 1.23 m : sol
de 1.23 à 22.23 m : formations fluvio- lacustres
deux nappes aquifères :
entre 3.33 et 11.03 m
entre 18.70 et 22.23 m

Ru 103 : cote = 788 m , nappes touchées à 6 m et à 21m

de 0 à 1 m : sable moyen noirâtre, quartzeux, terreux renfermant des débris de végétaux et de coquillages, ainsi qu'un peu de mica
de 1 à 4 m : sable moyen gris clair, quartzeux, légèrement argileux, renfermant un peu de mica et de la tourmaline
de 4 à 6 m : petit gravier quartzeux roulé, mélangé à du sable grossier, argileux, un peu de muscovite, de la tourmaline et de la magnétite
de 6 à 9 m : sable moyen, gris, micacé, argileux, mêlé de gravier fin roulé quartzeux
de 9 à 13.60 m : sable moyen à fin, jaunâtre quartzeux, faiblement argileux et micacé avec un peu de tourmaline.
de 13.60 à 17 m : argile jaunâtre avec passes verdâtres, micacé
de 17 à 19 m : argile jaune brun micacé
de 19 à 21 m : argile gris clair à gris foncé, micacé
de 21 à 22.80 m : sable fin, gris argileux et micacé
de 22.80 à 23.30 m : sable fin, gris micacé renfermant des concrétions dures, carbonatées et du bois décomposé
de 23.30 à 26.06 m : argile grise à gris foncé, sableuse et micacé

Interprétation
de 0 à 1 m : sol
de 1 à 26.06 m : formations fluvio lacustres
deux nappes aquifères : entre 6 et 13.60 m ; entre 21 et 23.30 m

Transversale n° 16

Ru 173 : cote = 778 m, nappe touchée à 8 m

de 0 à 1.10 m : sable fin terreux, micacé, humifère, avec radicelles
de 1.10 à 7 m : argile grise avec tâches jaunes légèrement sableuses
de 7 à 9 m : mélange d'argile grise et de sable grossier
de 9 à 12 m : sable très grossier gris, micacé, renfermant du gravier fin
de 12 à 13 m : sable fin gris clair, micacé, avec des grains de quartz
de 13 à 19 m : sable fin à très grossier, gris clair, micacé
de 19 à 21 m : sable fin gris clair, micacé, renfermant des grains de quartz

Interprétation

de 0 à 1.10 m : sol
de 1.10 m à 21 m : formations fluvio-lacustres
nappe aquifère entre 9 et 12 m

Ru 169 : cote = 778.5 m, nappes touchées à 6 et 15 m

de 0 à 1 m : argile grise ,sableuse, humifère, renfermant de fines paillettes de mica et des racines
de 1 à 3 m : argile grise sableuse et très micacée
de 3 à 4 m : sable grossier, argileux, avec des grains de quartz et de mica
de 4 à 5 m : argile grise compacte, avec des grains de quartz et de mica
de 5 à 6 m : argile grise, très sableuse, légèrement graveleuse et micacé
de 6 à 12 m : sable très grossier, gris clair, renfermant peu de mica
de 12 à 27 m : sable fin gris clair, finement micacé, avec grains de quartz
de 27 à 29.33 m : sable moyen gris clair, très micacé, avec grains de quartz

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 29.33 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 15 et 29.33 m

Ru 238 : cote = 784 m, nappes aquifères à 15 et 57 m

de 0 à 2 m : sable moyen quartzeux, noirâtre
de 2 à 10 m : sable grossier quartzeux
de 10 à 16 m : argile brune, puis grise, fine micacé
de 16 à 24 m : sable jaunâtre pulvérulent, un peu micacé
de 24 à 35 m : sable brunâtre fin, un peu argileux ,vers la base; sable argileux aggloméré par induration
de 35 à 38 m : sable fin beige clair, pulvérulent
de 38 à47 m : argile sableuse brune, cohérente, fine, micacée
de 47 à 50 m : sable fin blanchâtre, pulvérulent, micacé, induré à la base
de 50 à 54 m : argile brune sableuse compacte
de 54 à 65 m : argile grise indurée micacée avec nodules calcaires (intermèdes graveleux à 59 m)

Interprétation

de 0 à 2 m : sol
de 2 à 65 m : formations lacustres
nappe comprise entre 16 et 38 m
2e nappe signalé dans les intermèdes graveleux à 59 m

Ru 153 : cote = 818 m, nappe touchée à 24 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse brune
de 1 à 3 m : sable avec limon ferrugineux brun rouge
de 3 à 8 m : limon sablo-graveleux et argileux brun clair
de 8 à 12 m : sable fin silto-argileux jaune
de 12 à 20 m : limon sablo-graveleux et argileux jaune
de 20 à 21 m : sable non classé, graveleux, blanc jaunâtre, traces d'argile
de 21 à 24 m : argile silto-graveleuse avec calcaire, jaune brun
de 24 à 27 m : sable grossier, graveleux et calcalifère, légèrement argileux
de 27 à 28.50 m : limon sablo-graveleux et argileux

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 28.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 24 et 27 m

Ru 152 : cote = 812 m, nappe touchée à 14 m

de 0 à 1 m : terre végétale sableuse brun foncé
de 1 à 3 m : sable aggloméré par limon ferrugineux brun rougeâtre
de 3 à 8 m : argile très sablo-graveleuse jaune brunâtre
de 8 à 9 m : argile sableuse jaune
de 9 à 14.50 m : limon sablo-argileux jaunâtre
de 14.5 à 15 m : sable graveleux non classé, feldspathique, blanc jaunâtre
de 15 à 19 m : limon sablo-argileux jaune (sable très fin)
de 19 à 21 m : sable non classé, graveleux, blanc jaunâtre
de 21 à 25 m : argile silto sableuse jaune
de 25 à 27 m : argile sableuse gris foncé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 27 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 14 et 14.50 m

Ru 147/2: cote = 798 m, nappe touchée à 11 m

de 0 à 1 m : terre végétale noirâtre argilo limoneuse
de 1 à 4.5 m : argile grasse, gris foncé à jaune, graveleux
de 4.5 à 6 m : sable grossier graveleux, légèrement argileux, jaunâtre
de 6 à 10 m : sable fin très légèrement argileux, blanc jaunâtre
de 10 à 16 m : silt grossier argileux, légèrement sableux, jaunâtre
de 16 à 18 m : silt très graveleux, jaunâtre
de 18 à 21 m : gravier anguleux, sablo limoneux, jaunâtre
de 21 à 21.70 m : silt sablo-argileux, légèrement graveleux, jaunâtre
de 21.70 à 23 m : argile sablo graveleuse, gris jaunâtre
de 23 à 25 m : sable très fin, graveleux et argileux , jaunâtre
de 25 à 25.65 m : silt argileux jaunâtre
de 25.65 à 28.78 m : sable grossier graveleux, blanc jaunâtre
en dessous de 28.78 m : silt argileux blanc jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 28.78 m : formations fluvio lacustres
nappe comprise entre 11 et 21 m

Transversale n° 17

Ru 175 : cote = 776 m, nappe touchée à 7 m

de 0 à 1.20 m : sable fin gris brun, terreux, humifère et micacé
de 1.20 à 7 m : argile grise, légèrement jaunâtre, sableuse et micacé
de 7 à 8 m : sable grossier, gris, argileux, renfermant un peu de mica
de 8 à 13 m : sable très grossier gris clair avec du fin gravier et de mica
de 13 à 17 m : sable moyen à grossier, gris clair, micacé
de 17 à 18 m : argile grise, sableuse et micacée

Interprétation

de 0 à 1.20 m : sol
de 1.20 à 18 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 7 et 17 m

Ru 177 : cote = 778 m, nappe touchée à 4 m

de 0 à 1.30 m : sable fin gris brun
de 1.30 à 3 m : sable fin à moyen gris, gris, légèrement argileux et micacé
de 3 à 5.30 m : argile grise foncé, avec des bandes sableuses et micacées
de 5.30 à 11 m : sable fin à grossier gris clair, micacé, avec du fin gravier
de 11 à 18 m : sable très fin, gris à gris clair, très micacé
de 18 à 20.92 m : sable très fin gris foncé argileux et très finement micacé

Interprétation

de 0 à 1.30 : sol
de 1.30 à 20.92 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 5.30 et 11 m

Ru 147/1 : cote = 798 m, nappe touchée à 14 m

de 0 à 1 m : terre végétale très sableuse gris brun avec radicelles
de 1 à 4 m : sable argileux, graveleux, brun beige, calcareux
de 4 à 9 m : sable fin assez classé, jaunâtre, très légèrement argileux
de 9 à 14 m : sable fin à très fin jaune pâle, argileux et graveleux, calcalifère
de 14 à 15 m : gravier sableux, peu classé, jaunâtre
de 15 à 16 m : sable fin à moyen jaunâtre, avec galets émoussés
de 16 à 18 m : sable très fin, silto argileux, jaunâtre
de 18 à 19 m : sable très fin, silteux, non argileux, jaunâtre, très micacé
de 19 à 20 m : limon graveleux et argileux, jaunâtre
de 20 à 21 m : sable blanc jaunâtre graveleux
de 21 à 22 m : sable graveleux très argileux gris jaunâtre
de 22 à 23 m : sable fin non classé jaunâtre
de 23 à 26.50 m : sable non classé blanc jaunâtre avec traces d'argile
en dessous de 26.50 m : limon sablo graveleux et argileux jaunâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 26.50 m : formations fluvio-lacustres
nappe comprise entre 14 et 16 m

Ru 167/2 : cote = 807 m, nappe touchée à 19.20 m

de 0 à 1 m : terre végétale sablo-argileuse gris foncé
de 1 à 10.40 m : argile sablo-graveleuse jaune grisâtre, calcalifère
de 10.40 à 11 m : sable graveleux jaunâtre
de 11 à 13.70 m : argile sableuse à sablo graveleuse, calcalifère
de 13.7 à 15 m : gravier sablo-argileux jaunâtre, calcalifère
de 15 à 20 m : argile sablo-graveleuse jaune calcarifère
de 20 à 20.75 m : gravier argileux jaunâtre avec cailloux subroulés
de 20.75 à 24.15 m : argile sablo-graveleuse jaunâtre
de 24.15 à 25.50 m : sable fin à moyen légèrement graveleux jaune pâle
en dessous de 25.50 m : argile sableuse grisâtre calcalifère

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 25.50 m : dépôts fluvio lacustres
nappe aquifère comprise entre 20 et 20.75 m

Ru 170/2 : cote = 822 m, nappe touchée à 21.30 m

de 0 à 1 m : sable fin à moyen , gris noir, humifère, avec débris végétaux
de 1 à 8 m : argile gris foncé à jaune gris, sableuse, calcalifère, avec du mica
de 8 à 9 m : sable grossier jaune gris, argileux, renfermant du mica
de 9 à 10 m : argile jaune gris, sableuse, graveleuse, calcareuse et micacé
de 10 à 18 m : gravier sablo argileux gris jaune, calcarifère, avec du mica
de 18 à 21.30 m : argile jaune gris, sableuse, contenant un peu de mica
de 21.30 à 25 m : sable fin à grossier jaune gris, peu argileux, avec du gravier roulé
de 25 à 26.10 m : argile jaune gris, sableuse contenant un peu de mica
de 26.10 à 36.20 m : sable fin jaune, finement micacé
de 36.20 à 40 m : sable fin à grossier, jaune blanchâtre mélangé avec du gravier quartzeux roulé, légèrement feldspathique
de 40 à 44 m : sable très fin jaune gris, finement micacé, très légèrement argileux, renfermant des grains de quartz
de 44 à 45.30 m : sable fin gris jaune, micacé, renfermant du gravier roulé quartzeux, feldspathique, avec un peu de travertin calcaire

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 45.30 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 21.30 et 25 m

Ru 170/4 : cote = 825 m, nappe touchée à 21 m

de 0 à 1 m : sable fin gris foncé, terreux, renfermant un peu de mica et des débris de végétaux

de 1 à 2 m : argile brune, sableuse, légèrement micacé
de 2 à 8 m : argile gris jaune, sableuse, très calcarifère, renfermant très peu de mica mais de nombreux grains blancs de travertin calcaire
de 8 à 12 m : sable gris-jaunâtre, fin à grossier, argileux et calcalifère
de 12 à 13.20 m : caillou roulé de quartzite
de 13.20 à 14.10 m : argile jaune gris, très sableuse, calcarifère et micacé
de 14.10 à 21 m : argile gris clair, très sableuse, avec un peu de mica
de 21 à 22 m : sable jaune gris, fin à grossier, légèrement argileux
de 22 à 25.50 m : sable jaune très fin, argileux et finement micacé

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 25.50 m : alluvions récentes
nappes comprise entre 21 et 22 m

Ru 167/1 : cote = 807 m, nappe touchée à 13.20 m

de 0 à 1 m : terre végétale sablo argileuse foncé
de 1 à 13.20 m : argile très sableuse jaune brunâtre
de 13.20 à 19 m : gravier sablo-argileux jaune
de 19 à 21.25 m : argile sablo-graveleuse jaune pâle
de 21.25 à 23 m : argile silto-sableuse et graveleuse jaune pâle

Interprétation
de 0 à 1 m : sol
de 1 à 23 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 13.20 et 19 m

Ru 170/1 : cote = 820 m, nappe touchée à 22 m

de 0 à 1 m : terre superficielle, argilo sableuse brun foncé
de 1 à 9 m : argile sableuse brun chocolat, calcalifère
de 9 à 17 m : argile très sableuse calcalifère
de 17 à 18 m : gravier sablo-argileux jaunâtre, éléments peu roulés
de 18 à 22 m : argile très sableuse calcalifère jaune gris
de 22 à 25 m : sable tout venant, graveleux, feldspathique, jaune pâle
de 25 à 26.25 m : argile sablo-graveleuse, feldspathique, jaune grisâtre

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 26 m : alluvions récentes
nappe aquifère comprise entre 22 et 25 m

Ru 170/3 cote : 830 m nappe touchée à 30 m

de 0 à 1 m : argile gris foncé renfermant des débris de végétaux
de 1 à 5 m : argile brun gris sableuse et finement micacée
de 5 à 10 m : argile grise, très sableuse et graveleuse avec mica
de 10 à 13 m : argile grise sableuse avec des éléments de travertin calcaire
de 13 à 16 m : sable jaune gris, fin à grossier, argileux avec du mica
de 16 à 28 m : argile jaune gris, très sableuse, graveleuse, avec du mica
de 28 à 31 m : sable fin à grossier jaune gris, argileux, avec du mica
de 31 à 42 m : sable très fin jaune, micacé, argileux avec cailloux de quartz
de 42 à 43 m : argile jaune gris, sableuse, et finement micacé
de 43 à 47 m : sable très fin et argileux, micacé, avec cailloux de quartz
de 48 à 49 m : sable jaune, fin à grossier, renfermant un peu de mica

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 49 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 28 et 31 m

Description géologique des forages dans la partie congolaise

Ki 43 : cote = 870 m, nappe touchée à 58 m

de 0 à 0.50 m : sable fin gris foncé avec restes végétaux
de 0.50 à 8.50 m : sable argileux brunâtre avec grains de quartz
de 8.50 à 9.50 m : sable grossier quartzeux, grisâtre, avec cailloux de quartz
de 9.50 à 15 m : sable argileux brun foncé, micacé, avec cailloux de quartz
de 15 à 16 m : sable quartzeux brunâtre, peu argileux, induré à grains moyens
de 16 à 18 m : sable argileux brunâtre peu cohérent
de 18 à 25 m : sable argileux jaunâtre avec grains de quartz induré
de 25 à 37.50 m : sable argileux brun avec petits cailloux de quartz
de 37.50 à 38.50 m : sable argileux moyen, brunâtre, un peu quartzeux
de 38.50 à 44 m : sable argileux fin brunâtre, avec petits grains de quartz
de 44 à 44.50 m : gravier grossier(quartz et pegmatite)
de 44.50 à 52 m : sable argileux fin brunâtre avec petits grains de quartz
de 52 à 57 m : sable fin argileux, jaunâtre, micacé, avec petits cailloux de quartz
de 57 à 58 m : sable fin grisâtre très cohérent
de 58 à 58.50 m : sable grossier quartzeux et graveleux
de 58.50 à 63 m : sable argileux brunâtre, fin, cohérent, avec gravier
de 63 à 63.50 m : gravier quartzeux
de 63.50 m à 64 m : sable fin brunâtre avec gravier
de 64 à 65.50 m : sable argileux moyen brun foncé avec grains de quartz
de 65.50 à 66 m : sable moyen brunâtre argileux, micacé, quartzeux, induré
de 66 à 69 m : sable moyen et gravier quartzeux

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 69 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 58 et 69 m

Ki 37 : cote = 830 m, nappe touchée à 29 m

de 0 à 0.50 m : sable argileux fin brunâtre avec restes végétaux
de 0.50 à 4.50 m : sable argileux fin, rougeâtre avec grains de quartz grossiers
de 4.50 à 7 m : argile sableuse brun foncé à rougeâtre, cohérente, très fine
de 7 à 10.50 m : argile brun rougeâtre, finement micacée
de 10.50 à 11 m : sable argileux, rougeâtre, fin quartzeux
de 11 à 13.50 m : argile fine compacte, rougeâtre, micacée
de 13.50 à 14 m : argile sableuse, avec grains de quartz et de feldspath
de 14 à 18.50 m : argile fine compacte , rougeâtre, micacée
de 18.5 à 19 m : sable argileux brun rougeâtre, micacé avec quartz et nodules calcaires
de 19 à 20 m : argile rougeâtre, homogène, compacte, micacée
de 20 à 22.50m : argile brun foncé, micacée, sableuse
de 22.50 à 23.50 m : sable argileux brun foncé, un peu quartzeux
de 23.50 à 26 m : argile compacte brun rougeâtre, un peu micacé
de 26 à 27.50 m : sable argileux brunâtre, très micacé et quartzeux
de 27.50 à 29 m : argile brune rougeâtre, cohérente, micacée
de 29 à 29.50 m : cailloux quartzeux et feldspathiques

de 29.50 à 33 m : sable grossier blanchâtre, avec gravier quartzeux
de 33 à 33.50 m : sable fin grisâtre, micacé et quartzeux

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 33.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 29 et 33 m

Ki 223 : cote = 808 m, nappe touchée à 16.50 m

de 0 à 0.50 m : terre brune grossière, calcareuse
de 1 à 5.50 m : argile brune calcareuse avec petites concrétions calcaires
de 5.50 à 13.50 m : argile granuleuse beige calcareuse
de 13.50 à 16.50 m : argile gris beige peu ou pas calcareuse
de 16.50 à 21 m : sable quartzitique blanc fin avec quelques grains grossiers

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 21 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 16.50 et 21 m

Ki 51 : cote = 804 m, nappe touchée à 15 m

de 0 à 0.50 m : sable fin gris , terreux, micacé, avec végétaux
de 0.50 à 1 m : sable grossier jaune, argileux, micacé, avec du gravier fin
de 1 à 2 m : sable moyen, jaune, micacé, quartzeux
de 2 à 2.50 m : sable fin, brun argileux et micacé
de 2.50 à 5 m : sable grossier, brun, argileux, micacé, renfermant du fin gravier
de 5 à 9 m : sable fin à gravier brun foncé, très argileux et micacé
de 9 à 10 m : sable grossier, brun, peu argileux, micacé, avec du gravier fin quartzeux et feldspathique
de 10 à 11 m : sable fin, brun, micacé, renfermant, du fin gravier et des cailloux roulés de quartz et de pegmatite
de 11 à 12 m : mélange de sable fin et de gravier fin quartzeux feldspathique
de 12 à 13 m : gros gravier quartzeux et feldspathique roulé ou quartzeux
de 13 à 14.50 m : sable fin gris jaunâtre, finement micacé et argileux
de 14.50 à 19 m : sable très fin, brun clair à gris jaunâtre, argileux et micacé
de 19 à 19.50 m : sable grossier, jaune, micacé, renfermant de concrétions ferrugineuses
de 19.50 à 22.50 m : sable fin à très fin, peu argileux et très micacé
de 22.50 à 25.50 m : sable fin à grossier, jaune gris clair, micacé avec gravier fin
de 25.50 à 28 m : sable fin gris jaune micacé
de 28 à 32 m : sable très fin, gris clair, finement micacé, à tourmaline

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 32 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 22.50 et 25.50 m

Ki 197 : cote = 800 m

de 0 à 0.50 m : terre superficielle noirâtre
de 0.50 à 3 m : terre très calcareuse argilo-sableuse
de 3 à 4.50 m : argile sableuse beige foncé
de 4.50 à 9 m : sable cohérent, calcareux
de 9 à 10 m : argile sableuse calcareuse
de 10 à 11.50 m : argile beige onctueuse
de 11.50 à 18 m : argile grise pulvérulente et onctueuse
de 18 à 21.50 m : sable très fin
de 21.50 à 36.50 m : poudre argileuse onctueuse ou sable extrêmement fin

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 36.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 18 et 21.50 m

Ki 38 : cote = 820 m, nappe touchée à 13.50 m

de 0 à 0.50 m : sable noirâtre avec débris de racines
de 0.50 à 3.50 m : argile fine un peu sableuse, brunâtre à rougeâtre
de 3.50 à 5.50 m : sable argileux, brun, calcareux
de 5.50 à 7 m : argile sableuse, brunâtre, micacée
de 7 à 9 m : argile compacte, fine, brunâtre, micacée
de 9 à 10.50 m : sable argileux brunâtre, cohérent, micacé
de 10.50 à 13 m : sable fin, brun rougeâtre, micacé, avec petits cailloux de quartz
de 13 à 14.50 m : sable grossier brunâtre, quartzeux
de 14.50 à 20 m : sable fin et moyen, brun rougeâtre, quartzeux
de 20 à 22.50 m : sable fin grisâtre à brunâtre avec avec gravier
de 22.50 à 25.50 m : sable fin jaunâtre, avec gravier
de 25.50 à 26 m : sable grossier et moyen, quartzeux, grisâtre, avec gravier
de 26 à 27.50 m : gravier quartzeux
de 27.50 à 28 m : argile sableuse fine grisâtre, micacée, cohérente

Interprétation

de 0 à 1m : sol
de 1 à 28 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 13.50 et 28 m

Ki 192 : cote = 810 m

de 0 à 0.50 m : terre argileuse brun clair
de 0.50 à 12.50 m : argile brune sableuse avec quartz et paillettes de mica
de 12.50 à 14 m : gravier grossier à quartz et feldspath
de 14 à 17 m : argile brune avec grains disséminés de quartz et de feldspath
de 17 à 22.5 m : gravier de quartz et de feldspath avec une poudre très fine
de 22.5 à 24. 5 m : argile noire à rare grains de quartz mais beaucoup de mica

Interprétation

de 0 à 0.50 m sol
de 0.50 à 24.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 17 et 22.5 m

Ki 225 : cote = 804 m

de 1 à 0.50 m : terre végétale
de 0.50 à 1 m : gravier quartzeux à grains fins, imprégnant ferrugineux,
de 1 à 2.50 m : argile brune à grains de quartz
de 2.50 à 3 m : gravier de quartz avec un peu de mica
de 3 à 3.50 m : sable brun, quartz, mica
de 3.50 à 7 m : gravier de quartz grossier, avec fines paillettes de mica
de 7 à 8.50 m : argile brune à grains de quartz grossiers
de 8.50 à 10.50 m : sable grossier à quartz
de 10.50 à 12 m : gravier grossier, quartz, feldspath
de 12 à 15 m : argile brune contenant des éléments précédents

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 15 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 8.50 et 12 m

Ki 39 : cote = 815 m, nappe touchée à 20.50 m

de 0 à 0.50 m : sable fin noirâtre micacé
de 0.50 à 4 m : sable fin argileux, brun noirâtre, micacé, avec cailloux de quartz
de 4 à 4.50 m : argile fine, micacée, brunâtre, compacte
de 4.50 à 20.50 m : sable argileux, brun, hétérogène
de 20.50 à 23 m : sable fin à moyen, brun grisâtre, avec cailloux de quartz
de 23 à 23.50 m : cailloux de pegmatite et de quartzite
de 23.50 à 28.50 m : sable fin brunâtre, argileux, avec cailloux de quartz
de 28.50 à 30 m : gravier et sable grossier brunâtre et quartzeux
en dessous de 30 m : argile sableuse brun foncé rougeâtre, avec grains de quartz

Interprétation

de 0 à 0.50 m : sol
de 0.50 à 30 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 20.50 et 23.50 m

Ki 199 : cote = 795 m, nappe touchée à 10 m

de 0 à 1 m : terre brune
de 1 à 4.50 m : argile sableuse à débris végétaux, à débris de granite et de quartz
de 4.50 à 6.50 m : sable compacte
de 6.50 à 10.90 m : argile beige à débris divers, peu calcareux
de 10.90 à 14.50 m : sable gris grossier avec quelques paillettes de mica blanc
de 14.50 à 15 m : argile gris noir à débris végétaux

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 15 m alluvions récentes
nappe comprise entre 10.90 et 14.50 m

Ru 221 : cote = 795 m

de 0 à 1.50 m : terre brune
de 1.50 à 2 m : terre sableuse avec quelques grains de quartz
de 2 à 4 m : sable brun avec quartz et mica
de 4 à 4.50 m : sable grossier gris clair
de 4.50 à 8.50 m : sable argileux cohérent, légèrement calcareux
de 8.50 à 10 m : gravier dans un sable argileux gris clair
de 10 à 12 m : sable grossier et galets de quartz
de 12 à 14 m : sable brun gris, grossier, quartzitique
de 14 à 15.30 m : sable argileux cohérent

Interprétation

de 0 à 1.50 m : sol
de 1.50 à 15.50 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 8.50 et 17 m

Ki 41 : cote = 810 m, nappe touchée à 10 m

de 0 à 1.50 m :sable fin noirâtre à restes de végétaux
de 1.50 à 3.50 m : sable fin noirâtre
de 3.50 à 4 m : sable grisâtre fin, argileux et micacé
de 4 à 11.50 m : sable fin grisâtre quartzeux avec petits cailloux divers et nodules calcaires
de 11.50 à 12.50 m : gravier quartzeux
de 12.50 à 14 m : sable grossier quartzeux avec cailloux de quartz
de 14 à 23.5m : sable fin à très fin grisâtre, micacé, avec petits cailloux de quartz
de 23.50 à 25 m : gravier
de 25 à 28 m : sable très fin, gris clair, très micacé

Interprétation

de 0 à 1.50 m : sol
de 1.50 à 28 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 11.50 et 14 m

Ki 222 : cote = 795 m

de 0 à 1 m : terre brune
de 1 à 2 m : terre sableuse
de 2 à 7 m : sable fin à grossier, brun noir
de 7 à 8.5 m : sable argileux cohérent
de 8.5 à 9.5 m : argile gris noire calcareuse
de 9.5 à 10 m : argile noire granuleuse
de 10 à 13.5 m : sable grossier blanc avec du quartz et du feldspath
de 13.5 à 20 m : sable fin quartzeux, blanc

Interprétation

de 0 à 1 m : sol
de 1 à 20 m : alluvions récentes
nappe comprise entre 10 et 13.50 m

Ki 52/1 : cote = 785 m, nappe touchée à 8.50 m

de 0 à 1.50 m : sable fin à grossier, brun foncé, grisâtre, très micacé, renfermant de grains de quartz et des débris végétaux
de 1.50 à 3 m : sable fin à grossier blanc jaune avec de nombreux grains noirs de tourmaline et de magnétite, légèrement micacé
de 3 à 4 m : sable fin à grossier avec des grains de quartz assez gros et renfermant de la tourmaline
de 4 à 4.50 m : sable fin à grossier, jaune gris, argileux, avec mica
de 4.50 à 6.50 m : sable fin à grossier avec des grains de quartz assez gros et renfermant de la tourmaline
de 6.50 à 8.50 m : sable très fin, gris clair, micacé renfermant un fin gravier
de 8.50 à 17 m : sable très fin, gris clair à foncé, finement micacé
de 17 à 20 m : sable très fin, gris relativement foncé, très micacé et légèrement argileux
de 20 à 23 m :sable très fin, gris foncé, très micacé et argileux

de 23 à 23.50 m : bois fossile
de 23.50 à 26 m : sable très fin, gris foncé, très micacé et argileux

Interprétation

de 0 à 1.50 m : sol
de 1.50 à 26 m : alluvions fluvio lacustres
nappe comprise entre 8.50 et 17 m

Forages de la moyenne Rusizi

Secteur Kagunuzi

Ru 227 : cote = 825 m, nappe touchée à 30 m

de 0 à 14 m : argile brun foncé, cohérente hétérogène, débris de quartz, pegmatite, nodules ferrifères et calcaire ;
de 14 à 22 m : argile brun clair compacte, avec quartz et débris de pegmatites, micacé, assez quartzeux vers la base ;
de 22 à 30 m : argile grise compacte, hétérogène avec débris de schistes de quartz et de pegmatite ;
de 30 à 34 m : sable fin jaune clair, micacé, ferrugineux ;
de 34 à 37 m : argile grise compacte, hétérogène avec débris de schistes de quartz et de pegmatite ;
de 37 à 42 m : sable fin jaune clair, micacé, ferrugineux ;
de 42 à 45 m : argile grise compacte, hétérogène avec débris de schistes de quartz et de pegmatite ;
de 45 à 48 m : sable fin jaune clair quartzeux passant à du gravier fin à éléments divers.

Ru 228 : cote = 845 m, nappe touchée à 68 m

de 0 à 8 m : argile compacte, brune, hétérogène avec grains de quartz, nodules calcaires (très abondants) ;
de 8 à 23 m : argile cohérente, hétérogène, mais grise, avec quartz, nodules calcaires, gros micas rares ;
de 23 à 27 m : argile sableuse brune hétérogène, plus micacé ;
de 27 à 31 m : argile cohérente, hétérogène, mais grise, avec quartz, nodules calcaires, gros micas rares ;
de 31 à 38 m : sable argileux fin avec limonite ;
de 38 à 45 m : sable fin limoneux jaune foncé, micacé, parfois induré ;
de 46 à 49 m : gravier quartzeux avec nombreux nodules calcareux assez grossier parfois cimenté par le calcaire ;
de 49 à 51 m : argile grise verdâtre compacte micacée hétérogène avec éléments de gravier ;

de 51 à 57 m : gravier quartzeux avec nombreux nodules calcareux assez grossier parfois cimenté par le calcaire ;
de 57 à 60 m : argile brune compacte hétérogène micacé avec éléments calcareux ;
de 60 à 68 m : sable fin grisâtre calcareux et argileux avec gravier quartzeux ;

de 68 à 70 m : argile grise, claire calcareuse, cohérente avec gravier quartzeux ;
de 70 à 74 m : sable fin grisâtre micacé, parfois cimenté par le calcaire ;
de 74 à 78 m : argile verdâtre, compacte, homogène, quartzeuse ;
de 78 à 80 m : gravier grossier quartzeux passant à du sable fin ;
de 80 à 81 m : argile verdâtre, compacte, homogène, quartzeuse ;

Secteur Ndava

Ru 223 : Cote = 848 m, nappe touchée à 61 m

de 0 à 7 m : argile noirâtre à grise compacte, micacée, hétérogène à grains de quartz, nodules de limonite avec restes végétaux ;
de 7 à 16 m : sable argileux brunâtre, limoneux, parfois induré, quartzeux fin à grossier, peu micacé,
de 16 à 27 m : argile brune compacte, hétérogène, à débris de schistes gris et galets de quartz, limoneuse, certaines passes sont sableuses ;
de 27 à 32 m : sable argileux brun verdâtre, quartzeux induré assez homogène ;
de 32 à 49 m : sable fin à moyen beige, quartzeux, parfois induré, avec gros galets roulés de quartz ;
de 49 à 51 m : argile sableuse à verdâtre, à grains, assez homogène, induré de quartz peu roulé et limonite ;
de 51 à 53 m : sable fin à grossier quartzeux micacé ;
de 53 à 61 m : argile jaunâtre, compacte avec débris de schistes gris, gros micas, quartz ;
de 61 à 67 m : sable fin à grossier quartzeux micacé .

Ru 222 : Cote = 844 m, nappe touchée à 77 m

de 0 à 4 m : argile brune grossière latéritisée, compacte ;
de 4 à 10 m : argile grise, micacée hétérogène, avec quartz, nodules calcaires et débris de schistes ;
de 10 à 21 m : argile sableuse, brune avec gros micas, quartz et débris de schistes ;
de 21 à 27 m : sable brun, un peu argileux, avec quartz, micas, feldspaths et débris de schiste ;
de 27 à 32 m : argile grise cohérente hétérogène micacée provenant de schistes gris, avec limonite, micacé ;
de 32 à 38 m : argile grise cohérente hétérogène micacée provenant de schistes gris, avec limonite, micacé, avec galets de quartz ;
de 38 à 68 m : sable fin micacé grisâtre, provenant de schistes ; certaines passes contiennent des débris végétaux ;
de 68 à 87 m : schistes gris à brun moins micacé, à débris végétaux avec grains de vivianite ;
de 87 à 93 m : schistes gris brun lités finement micacés, à débris végétaux avec lentilles de limonite et quartz ;
de 93 à 96 m : gravier fin quartzeux peu roulé ;
de 96 à 98 m : sable fin, micacé quartzeux avec nodules de fer provenant probablement d'un grès conglomératique ;
de 98 à 100 m : schistes gris brun lités finement micacés, à débris végétaux avec lentilles de limonite et quartz ;

Ru 231 : Cote = 839 m, nappe touchée à 37.6 m

de 0 à 6 m : argile brunâtre compacte, hétérogène ferrifère, latérite au sommet, micacée, nodules calcaires et débris de schistes et quartz ;
de 6 à 8 m : sable fin brunâtre, un peu argileux, compact, induré, hétérogène à nodules calcaires, quartz et schistes, micacé ;
de 8 à 23 m : argile brunâtre compacte, hétérogène ferrifère, latérite au sommet, micacée, nodules calcaires et débris de schistes et quartz, avec des passes de sable fin ;
de 23 à 29 m : argile sableuse brun clair compacte, avec micas, quartz, débris de schistes, grain assez fin ;
de 29 à 35 m : gravier quartzeux, fin , puis grossier, avec éléments roulés ;
de 35 à 60 m : sable fin grisâtre très micacé avec galets de quartz , puis bois fossile provenant de ce quartz ;
de 60 à 68 m : schiste gris foncé, fin micacé, à vivianite, limonite ;
de 68 à 73 m : schiste gris foncé finement et abondamment micacé, passant à un sable fin gris à débris végétaux fossiles ;
de 73 à 82 m : schiste gris foncé, fin micacé, à vivianite, limonite, avec débris végétaux ;

Ru 232 : Cote = 842 m, nappe touchée à 51 m

de 0 à 15 m : argile brun foncé, hétérogène , compacte, avec limonite , débris végétaux et quartz ;
de 15 à 28 m : argile fine, jaunâtre, micacée limoneuse, à débris de schistes, un peu sableuse, avec quelques galets de quartz ;
de 28 à 41 m : argile gris foncé, provenant de schistes abondamment micacés, finement litée, limonite, débris végétaux ;
de 41 à 46 m : sable fin très micacé gris foncé avec galets de quartz provenant de schistes ;
de 46 à 51 m : argile gris verdâtre compacte, avec quartz et débris de schistes provenant de schistes verts ;
de 51 à 56 m : sable fin très micacé gris foncé avec galets de quartz provenant de schistes, induré vers la base, avec gravier roulé ;
de 56 à 57 m : Galets de quartz et feldspaths roulés ;
de 57 à 58 m : argile gris verdâtre compacte, avec quartz et débris de schistes provenant de schistes verts ;

Secteur Buganda

Ru 212 : Cote = 884 m, nappe touchée (?)

de 0 à 2 m : latérite compacte ;
de 2 à 3.50 m : latérite grenailleuse ;
de 3.50 à 6 m : sable un peu argileux brunâtre ;
de 6 à 17.50 m : argile sableuse brunâtre hétérogène, compacte avec quartz, quartzite et oxydes de fer ;
de 17.5 à 28.5 m : argile sableuse fine jaunâtre homogène, avec quartz, micacé ;
de 28.5 à 43 m : argile brunâtre compacte hétérogène avec éléments schisteux ;
de 43 à 44 m : argile grise provenant de l'altération de schistes ; présence de lentilles ferrifères et plaquettes de schistes gris clair et tendre ;
de 44 à 61 m : schistes gris vert et tendre avec débris végétaux et restes de fossiles ;

Ru 213 : Cote = 925 m, nappe non atteinte

de 0 à 3 m : latérite compacte ;
de 3 à 7.5 m : latérite grenailleuse hétérogène avec galets de quartz , éléments divers éluvionnaires (calcaires, pegmatites, quartzites)
de 7.5 à 9 m : gravier fin quartzeux ;
de 9 à 21 m : argile hétérogène compacte avec quartz, nodules calcaires jusqu'au bedrock quartzeux.

Ru 217 : Cote = 841.63 m, nappe touchée à 44.3 m

de 0 à 4 m : argile foncé, compacte ;
de 4 à 22 m : argile jaunâtre, hétérogène, compacte, avec débris de schistes gris, micacé, avec un peu de sable et nodules calcaires vers la base ;
de 22 à 36 m : schiste gris foncé, broyé, micacé, compacte ;
de 36 à 43 m : schiste gris verdâtre avec nodules carbonatés calcaires et ferrifères, micacé, formant par broyage une argile hétérogène compacte ;
de 43 à 45.8 m : argile brunâtre ferrifère, un peu sableuse et compacte, hétérogène, débris de schistes, nodules calcaires, limonite, avec une passe sableuse à 44.30 m.

Ru 218 : Cote = 839 m, nappes touchées à 57 et 66.5 m

de 0 à 3 m : sable limoneux et argileux brun foncé ;
de 3 à 20 m : argile compacte brun-jaunâtre, hétérogène avec débris de schistes ; quartz et nodules calcaires ;
de 20 à 23 m : sable argileux brun, micacé, gréseux ;
de 23 à 27 m : argile compacte brun-jaunâtre, hétérogène avec débris de schistes ; quartz et nodules calcaires ;
de 27 à 55 m : argile grise foncée compacte provenant de schistes gris clair, tendre débris végétaux, limonite, vivianite et micas ;

de 55 à 59 m : argile sableuse grise fine, compacte, provenant de schistes gréseux fins, micacés, avec galets de quartz roulés et nodules

limoneux ;
de 59 à 63 m : sable grossier induré avec galets de quartz provenant d'un grès conglomératique ;
de 63 à 65 m : argile sableuse grise fine, compacte, provenant de schistes gréseux
fins, micacés, avec galets de quartz roulés et nodules limoneux ;
de 65 à 67 m : sable grossier induré avec galets de quartz provenant d'un grès conglomératique ;
de 67 à 69.40 m : sable grossier quartzeux provenant d'un grès gris brunâtre avec galets de quart et paillettes de mica , débris végétaux ;
de 69.40 à 70.80 m : schistes gréseux gris brunâtre , avec petits éléments de quartz et paillettes de mica ; débris végétaux.

Ru 219 : Cote = 910 m, nappe atteinte à (?)

de 0 à 1.50 m : terre végétale ;
de 1.50 à 16.50 m : argile brune, compacte hétérogène avec galets de quartz et nodules calcaires ;
de 16.50 à 19 m : gravier quartzeux et sable brunâtre induré ;
de 19 à 20 m : argile brune, compacte hétérogène avec galets de quartz et nodules calcaires ;
de 20 à 35.50 m : grès brunâtre tendre un peu micacé avec éléments quartzeux et quelques passes graveleuses ;
de 35.50 à 39.50 m : gravier fin quartzeux jaunâtre ;
de 39.5 à 45 m : argile sableuse indurée jaunâtre, cohérente, avec un peu de mica ;
de 45 à 51 m : argile sableuse brune, plus hétérogène, avec quartz ;
de 51 à 59.50 m : gravier moyen quartzeux homogène ;
de 59.50 à 65.50 m : argile sableuse grise micacée compacte avec gravier fin quartzeux ;
de 65.50 à 80.50 m : gravier grossier quartzeux roulé ;
de 80.50 à 82 m : sable argileux gris passant au bedrock.

Ru 224 : Cote = 810 m, nappe atteinte à 41 m

de 0 à 10 m : sable noirâtre induré avec quartz blanc et micas pas par à un gravier quartzeux grossier vers la base ;
de 10 à 41 m : schiste gris foncé micacé contenant des débris végétaux et des nodules limoneux ;
de 41 à 46 m : grès grisâtre, micacé quartzeux passant à un gravier fin par broyage, puis plus bas transitoire à des schistes gris micacé vers la base.

Ru 225 Cote : 810 m nappe touchée à (?)

de 0 à 7 m : argile sableuse cohérente, brune noire en surface, brune à partir d'un mètre, hétérogène avec grains de quartz, débris de schistes, galets roulés de quartz et micas fins ;
de 7 à 12 m : argile compacte, brun-clair, hétérogène, avec quartz roulés, débris de schistes et nodules de limonite ;
de 12 à 17 m : argile compacte, gris foncé, provenant de schistes argileux gris foncés finement micacés, restes végétaux ;
de 17 à 22 m : schiste brun, avec des micas très fins et lentilles limoneuses, certaines passes sont plus micacées ;
de 22 à 35 m : schiste brun, avec des micas très fins et lentilles limoneuses, certaines passes sont plus micacées ; restes végétaux ; grains de vivianite et nodules de limonite ;
de 35 à 49 m : Idem au précédent, mais avec petits galets de quartz ;
de 49 à 51 m : gravier grossier quartzeux mélangé à du sable argileux provenant du schiste gris ;
de 51 à 91 m : schistes fins gris verdâtre, peu et finement micacé, avec vivianite, limonite et petits grains de quartz, restes végétaux rares.

Secteur Rugombo

Ru 216 : Cote = 920 m, nappe touchée à 22 m

de 0 à 4 m : argile rougeâtre latéritique, compacte, avec grains de quartz
de 4 à 7.5 m : argile fine brun rouge, un peu sableuse, cohérente, avec nodules calcaires eu grains de quartz ;
de 7.5 à 13 m : argile fine brun rouge, non compacte, un peu sableuse, cohérente, avec nodules calcaires eu grains de quartz, débris de schistes et limonite ;
de 13 à 15.5 m : sable argileux beige, avec débris de schistes vert pyriteux, de quartz , limonite et nodules calcaires ;
de 15.5 à 19.5 m : argile brune hétérogène avec débris de schistes gris, restes végétaux et limonite ;
de 19.5 à 20 m : argile brune hétérogène avec galets de quartz, débris de schistes gris, restes végétaux et limonite ;
de 20 à 22 m : argile sableuse fine brune, un peu indurée avec débris de schistes gris et galets de quartz ;
de 22 à 22.8 m : sable fin jaunâtre anguleux provenant probablement du broyage de gros éléments quartzeux.

Secteur Cibitoke

Ru 221 : Cote = 937 m, nappe touchée à 35 m

de 0 à 11 m : fins graviers et gros cailloux quartzeux, latéritisés ;
de 11 à 15 m : sable rougeâtre, grossier latéritisé, gros cailloux de quartz et diorite ;
de 15 à 18 m : éléments de pegmatite altérée ;
de 18 à 48 m : sable grossier hétérogène induré, rougeâtre, éléments de pegmatite, de quartz et de grès ;
de 48 à 51 m : schistes micacées grisâtres altérés ;
de 51 à 62 m : grès clairs et quartz en éléments roulés ou agglomérés ;
de 62 à 73 m : schistes gris micacés avec petits quartz roulés ;
de 73 à 83 m : quartz roulé et broyé, gravier grossier passant à des schistes à la base ;
de 83 à 84.2 m : schiste gris clair tendre ;
de 84.20 à 87 m : schiste broyé avec lits de pyrite ;
de 87 à 88 m : quartz broyé roulé ;
de 88 à 91 m : schiste broyé avec lits de pyrite ;
de 91 à 92.30 m : quartz broyé roulé ; le forage s'arrête dans argile correspondant probablement aux schistes

Annexe II: Pluviométrie

II.1 Pluviométrie de la plaine

Station de Bujumbura aéroport

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	29	80	119	91	138	84	62	113	132	23	0	0	**870**
73-74	64	50	58	32	109	83	111	140	51	11	33	10	**752**
74-75	23	20	130	58	122	75	132	61	11	10	16	0	**658**
75-76	53	44	41	101	86	81	64	79	86	5	1	21	**661**
76-77	56	61	52	111	103	83	80	175	32	1	0	45	**799**
77-78	46	14	143	94	78	71	214	147	22	10	0	27	**865**
78-79	17	28	62	100	77	143	109	212	98	9	0	3	**859**
79-80	3	49	201	48	114	25	70	85	105	2	0	0	**702**
80-81	60	54	117	232	74	95	93	64	49	0	0	62	**899**
81-82	35	50	62	117	40	68	77	148	75	9	0	1	**683**
82-83	18	74	118	163	78	73	147	157	17	2	0	19	**866**
83-84	53	77	53	71	158	79	109	103	37	0	7	1	**748**
84-85	9	59	109	165	74	120	163	105	46	4	0	0	**853**
85-86	41	10	137	71	120	91	139	231	27	35	0	0	**902**
86-87	38	92	113	120	97	85	81	110	101	0	0	0	**837**
87-88	106	35	123	23	149	45	88	125	8	0	0	66	**768**
88-89	30	97	126	124	146	152	162	130	147	11	7	13	**1145**
89-90	23	97	49	170	68	170	125	99	27	1	0	10	**839**
90-91	48	92	57	43	46	113	110	94	72	6	8	4	**690**
91-92	14	111	81	111	59	87	97	50	101	8	0	0	**718**
Moy	**38**	**60**	**98**	**102**	**97**	**91**	**112**	**121**	**62**	**7**	**4**	**14**	**806**
Max	**106**	**111**	**201**	**232**	**158**	**170**	**214**	**231**	**147**	**35**	**33**	**66**	**1145**
min	**3**	**10**	**41**	**23**	**40**	**25**	**62**	**50**	**8**	**0**	**0**	**0**	**658**
C.pluvio	**0.05**	**0.07**	**0.12**	**0.13**	**0.12**	**0.11**	**0.14**	**0.15**	**0.08**	**0.01**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Station de l' Imbo semencier

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	38	81	148	110	122	61	47	64	103	21	0	0	**796**
73-74	65	57	118	68	98	35	62	105	63	26	13	9	**719**
74-75	31	37	99	71	150	78	136	69	16	4	49	0	**739**
75-76	68	60	55	125	63	90	42	125	31	12	0	36	**706**
76-77	45	97	38	31	101	63	116	149	45	6	0	25	**716**
77-78	45	24	121	87	56	50	200	73	32	13	0	0	**700**
78-79	21	34	31	97	60	179	91	180	95	15	0	25	**827**
79-80	2	32	200	104	122	47	78	69	108	9	0	5	**776**
80-81	49	82	113	184	40	84	100	135	40	1	5	78	**909**
81-82	37	95	104	86	79	70	62	111	119	15	0	0	**778**
82-83	14	92	161	131	90	49	142	146	32	0	0	10	**868**
83-84	16	35	99	65	98	58	83	101	14	0	4	7	**580**
84-85	13	42	125	84	84	127	119	109	34	1	0	0	**736**
85-86	34	36	199	98	147	140	78	234	37	14	0	3	**1019**
86-87	28	79	95	70	139	17	65	93	163	0	0	0	**748**
87-88	99	49	112	75	145	88	104	116	44	0	4	99	**933**
88-89	57	70	93	190	179	121	95	184	87	39	16	2	**1133**
89-90	63	44	93	127	72	50	166	124	59	0	0	5	**803**
90-91	33	58	57	68	72	123	188	96	110	26	0	2	**833**
91-92	30	93	112	172	90	133	114	74	96	3	0	0	**917**
Moy	**39**	**60**	**109**	**102**	**100**	**83**	**104**	**118**	**66**	**10**	**5**	**15**	**812**
Max	**99**	**97**	**200**	**190**	**179**	**179**	**200**	**234**	**163**	**39**	**49**	**99**	**1133**
min	**2**	**24**	**31**	**31**	**40**	**17**	**42**	**64**	**14**	**0**	**0**	**0**	**580**
C.pluvio	**0.05**	**0.07**	**0.13**	**0.13**	**0.12**	**0.10**	**0.13**	**0.15**	**0.08**	**0.01**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Station de Cibitoke

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	6	136	129	84	105	66	77	87	223	0	0	0	**913**
73-74	100	80	206	134	91	38	163	143	57	62	23	0	**1097**
74-75	52	29	163	37	157	110	104	99	23	2	19	0	**795**
75-76	54	32	23	78	28	92	119	97	83	0	0	45	**650**
76-77	50	42	136	67	171	81	129	100	145	7	0	23	**950**
77-78	58	35	132	112	106	88	247	15	69	0	0	26	**888**
78-79	39	103	105	74	74	119	134	184	154	17	0	0	**1002**
79-80	2	76	62	68	135	145	162	104	101	17	0	3	**876**
80-81	65	37	114	224	44	105	105	157	82	0	0	20	**951**
81-82	46	57	56	101	98	94	26	138	162	12	0	2	**791**
82-83	11	114	106	96	57	44	202	171	8	19	0	28	**854**
83-84	22	132	54	37	156	84	136	61	4	0	10	27	**723**
84-85	1	41	179	118	94	58	94	280	63	21	0	1	**949**
85-86	60	95	130	115	91	118	115	238	82	1	0	0	**1044**
86-87	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
87-88	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
88-89	36	113	99	105	237	130	144	159	135	18	13	3	**1192**
89-90	18	55	119	99	78	76	160	135	28	0	0	3	**770**
Moy	**39**	**74**	**113**	**97**	**107**	**90**	**132**	**135**	**89**	**11**	**4**	**11**	**903**
Max	**100**	**136**	**206**	**224**	**237**	**145**	**247**	**280**	**223**	**62**	**23**	**45**	**1192**
Min	**1**	**29**	**23**	**37**	**28**	**38**	**26**	**15**	**4**	**0**	**0**	**0**	**650**
C.pluvio	**0.04**	**0.08**	**0.13**	**0.11**	**0.12**	**0.10**	**0.15**	**0.15**	**0.10**	**0.01**	**0.00**	**0.01**	**1.00**

Station de Mparambo

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	11	116	180	114	87	107	64	107	183	1	7	0	**976**
73-74	116	129	113	114	120	75	112	116	100	58	26	5	**1084**
74-75	54	34	128	45	99	32	226	83	19	19	7	0	**745**
75-76	69	30	47	84	26	80	133	58	79	11	0	65	**682**
76-77	81	40	52	52	107	151	108	198	71	29	0	65	**954**
77-78	61	49	214	103	93	97	160	108	117	1	0	20	**1022**
78-79	34	95	139	146	81	104	134	145	122	32	1	3	**1032**
79-80	7	81	119	41	119	76	154	56	174	7	0	2	**836**
80-81	44	92	187	135	139	123	95	117	103	14	0	24	**1072**
81-82	78	69	50	132	139	68	74	165	71	5	0	3	**853**
82-83	57	117	138	119	45	57	183	164	26	35	0	26	**966**
83-84	68	101	64	95	103	85	92	99	12	0	29	46	**793**
84-85	11	84	139	89	66	58	112	276	74	24	0	0	**932**
85-86	74	25	71	77	114	87	81	194	51	7	0	1	**782**
86-87	35	160	89	94	183	86	207	106	157	34	2	12	**1165**
87-88	53	76	137	43	131	122	142	127	46	0	70	25	**972**
88-89	44	16	80	129	140	83	141	148	200	7	18	8	**1013**
89-90	15	80	133	76	183	79	194	109	40	1	0	26	**935**
90-91	64	78	67	209	61	88	135	171	147	26	8	5	**1059**
91-92	25	182	62	62	49	64	120	161	128	11	0	0	**864**
Moy	**50**	**83**	**110**	**98**	**104**	**86**	**133**	**135**	**96**	**16**	**8**	**17**	**937**
Max	**116**	**182**	**214**	**209**	**183**	**151**	**226**	**276**	**200**	**58**	**70**	**65**	**1165**
min	**7**	**16**	**47**	**41**	**26**	**32**	**64**	**56**	**12**	**0**	**0**	**0**	**682**
C.pluvio	**0.05**	**0.09**	**0.12**	**0.10**	**0.11**	**0.09**	**0.14**	**0.14**	**0.10**	**0.02**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

II.2 Pluviométrie des contreforts

Station de Mabayi

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	72	103	273	420	216	210	177	191	219	20	0	25	**1926**
73-74	192	173	239	225	248	205	245	350	259	126	108	26	**2395**
74-75	32	170	241	81	211	106	210	257	84	25	14	16	**1445**
75-76	182	195	85	240	138	159	147	199	93	26	7	66	**1537**
76-77	42	137	275	108	202	146	228	257	134	11	0	57	**1597**
77-78	107	77	230	225	123	208	293	241	157	12	0	8	**1680**
78-79	189	142	220	166	112	237	103	253	252	62	0	24	**1758**
79-80	21	112	309	216	259	328	332	232	323	29	3	10	**2173**
80-81	115	211	245	242	164	147	213	221	231	12	4	59	**1863**
81-82	72	158	203	190	221	182	310	280	279	47	2	16	**1960**
82-83	83	243	451	176	243	105	287	272	104	45	2	119	**2128**
83-84	86	363	264	154	279	200	354	173	35	0	13	79	**1999**
84-85	55	128	293	213	229	139	200	443	171	56	4	2	**1935**
85-86	173	129	319	306	253	193	168	291	173	34	0	13	**2052**
86-87	55	188	279	224	331	197	318	366	258	31	14	52	**2313**
87-88	290	198	378	158	357	445	375	368	76	3	26	175	**2850**
88-89	145	175	358	221	145	145	344	249	136	32	74	91	**2114**
89-90	73	308	308	287	144	344	362	373	240	48	0	40	**2528**
90-91	120	104	273	246	314	199	239	212	355	151	19	13	**2244**
91-92	80	349	156	235	195	128	296	370	141	130	0	0	**2080**
Moy	**109**	**183**	**270**	**217**	**219**	**201**	**260**	**280**	**186**	**45**	**15**	**44**	**2029**
Max	**290**	**363**	**451**	**420**	**357**	**445**	**375**	**443**	**355**	**151**	**108**	**175**	**2850**
min	**21**	**77**	**85**	**81**	**112**	**105**	**103**	**173**	**35**	**0**	**0**	**0**	**1445**
C.pluvio	**0.05**	**0.09**	**0.13**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.13**	**0.14**	**0.09**	**0.02**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Station de Musigati

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	115	265	251	220	254	57	94	244	190	18	0	11	**1716**
73-74	240	193	313	320	95	184	355	346	277	66	23	38	**2449**
74-75	385	110	240	180	220	114	143	141	26	10	11	7	**1588**
75-76	80	118	17	172	180	138	226	161	216	13	5	88	**1413**
76-77	102	164	146	131	220	255	203	221	86	25	0	117	**1670**
77-78	33	92	247	248	208	303	371	224	76	91	14	42	**1947**
78-79	89	244	212	207	128	128	107	196	155	38	0	3	**1507**
79-80	13	99	226	194	170	127	185	215	311	31	4	2	**1577**
80-81	150	199	216	203	181	82	251	182	240	16	2	63	**1783**
81-82	96	147	80	128	193	119	129	346	220	52	1	5	**1515**
82-83	66	282	374	308	43	186	283	240	106	6	5	49	**1946**
83-84	54	185	181	137	162	138	155	234	38	0	25	49	**1357**
84-85	52	199	206	98	186	255	293	323	78	55	0	0	**1745**
85-86	106	120	241	115	184	184	138	281	215	22	0	0	**1605**
86-87	88	212	193	137	242	212	166	302	160	4	0	17	**1732**
87-88	132	166	367	85	252	210	274	249	120	0	16	15	**1885**
88-89	98	152	175	154	265	151	171	153	129	50	48	82	**1626**
89-90	42	110	134	200	167	156	208	269	117	0	0	7	**1408**
90-91	88	177	145	96	158	114	100	278	265	45	0	0	**1463**
91-92	64	160	96	168	121	173	154	260	123	28	0	0	**1345**
Moy	**105**	**170**	**203**	**175**	**181**	**164**	**200**	**243**	**157**	**28**	**8**	**30**	**1664**
Max	**385**	**282**	**374**	**320**	**265**	**303**	**371**	**346**	**311**	**91**	**48**	**117**	**2449**
min	**13**	**92**	**17**	**85**	**43**	**57**	**94**	**141**	**26**	**0**	**0**	**0**	**1345**
C.pluvio	**0.06**	**0.10**	**0.12**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.12**	**0.15**	**0.09**	**0.02**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

II.3 Pluviométrie de la Crête Congo-Nil

Station de Teza

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	170	187	238	227	164	204	52	153	169	27	0	0	**1590**
73-74	**247**	141	318	121	133	116	128	286	223	81	37	10	**1840**
74-75	110	102	144	157	161	186	168	228	107	3	25	1	**1392**
75-76	106	235	149	169	62	168	153	221	102	28	2	53	**1448**
76-77	201	167	178	177	192	131	156	230	117	18	5	48	**1618**
77-78	73	55	336	169	112	199	327	338	58	29	0	54	**1751**
78-79	153	117	157	232	158	294	152	393	115	38	0	3	**1811**
79-80	**0**	93	252	251	174	192	162	176	178	3	0	2	**1482**
80-81	92	255	194	184	148	121	243	203	182	11	7	69	**1709**
81-82	121	149	191	192	166	102	278	273	121	14	0	0	**1606**
82-83	107	158	357	152	100	154	215	246	82	9	1	63	**1642**
83-84	67	204	191	158	225	143	183	136	65	0	16	48	**1435**
84-85	78	141	216	201	211	145	260	358	63	4	0	1	**1677**
85-86	120	120	286	211	192	119	168	284	189	11	0	4	**1702**
86-87	41	219	246	159	241	211	172	270	178	12	1	0	**1751**
87-88	176	136	336	113	191	214	300	293	46	0	3	94	**1902**
88-89	68	169	239	217	180	206	222	149	140	45	22	26	**1683**
89-90	69	116	132	172	104	213	220	207	108	0	0	53	**1394**
90-91	122	112	169	153	130	126	184	274	182	47	0	14	**1513**
91-92	56	204	124	175	161	169	128	268	132	20	0	0	**1436**
Moy	**109**	**154**	**223**	**180**	**160**	**171**	**194**	**249**	**128**	**20**	**6**	**27**	**1619**
Max	**247**	**255**	**357**	**251**	**241**	**294**	**327**	**393**	**223**	**81**	**37**	**94**	**1902**
min	**0**	**55**	**124**	**113**	**62**	**102**	**52**	**136**	**46**	**0**	**0**	**0**	**1392**
C.pluvio	**0.07**	**0.10**	**0.14**	**0.11**	**0.10**	**0.11**	**0.12**	**0.15**	**0.08**	**0.01**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Station de Rwegura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	156	191	265	162	198	200	91	289	239	29	0	3	**1824**
73-74	240	115	269	223	78	97	200	218	193	73	10	1	**1718**
74-75	102	62	180	91	164	97	194	304	98	14	13	4	**1324**
75-76	56	203	105	198	89	118	214	230	171	25	23	87	**1519**
76-77	137	146	162	196	164	118	189	193	109	7	21	91	**1531**
77-78	111	64	312	258	122	167	338	236	80	13	0	32	**1733**
78-79	82	169	159	235	233	236	155	275	220	36	0	13	**1814**
79-80	27	114	131	215	157	143	175	140	152	70	0	9	**1333**
80-81	75	174	182	132	157	64	185	217	180	4	0	117	**1485**
81-82	108	139	193	179	165	70	206	342	168	39	0	7	**1616**
82-83	152	159	345	239	72	103	201	317	93	15	0	28	**1724**
83-84	76	204	149	207	232	119	223	188	38	0	20	64	**1521**
84-85	81	170	180	93	234	209	189	355	79	22	0	0	**1612**
85-86	144	49	247	152	154	254	166	337	160	42	0	2	**1706**
86-87	122	286	234	117	190	121	166	226	193	9	3	22	**1689**
87-88	202	89	301	179	245	205	424	387	39	0	0	91	**2161**
88-89	79	195	169	240	220	170	281	205	143	45	47	33	**1827**
89-90	79	205	92	195	63	233	214	270	76	3	0	29	**1457**
90-91	175	162	201	221	178	174	169	335	267	39	2	4	**1927**
91-92	75	226	113	152	145	180	234	236	154	30	0	0	**1546**
Moy	**114**	**156**	**199**	**184**	**163**	**154**	**211**	**265**	**143**	**26**	**7**	**32**	**1653**
Max	**240**	**286**	**345**	**258**	**245**	**254**	**424**	**387**	**267**	**73**	**47**	**117**	**2161**
min	**27**	**49**	**92**	**91**	**63**	**64**	**91**	**140**	**38**	**0**	**0**	**0**	**1324**
C.pluvio	**0.07**	**0.09**	**0.12**	**0.11**	**0.10**	**0.09**	**0.13**	**0.16**	**0.09**	**0.02**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie pondérée des bassins

Pluviométrie de la Nyakagunda

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	49	108	239	**307**	168	172	135	159	206	13	2	16	1575
73-74	164	157	192	184	201	157	196	263	200	101	**77**	18	1910
74-75	40	120	199	**68**	169	**79**	215	193	60	22	11	10	**1186**
75-76	140	134	**71**	183	**97**	130	142	147	88	20	4	66	1221
76-77	56	101	192	87	167	148	183	235	111	18	**0**	60	1359
77-78	90	**67**	224	180	112	167	244	192	142	8	**0**	12	1437
78-79	132	124	190	158	100	188	**114**	213	204	51	**0**	16	1490
79-80	**16**	100	239	151	207	235	266	167	268	21	2	7	1678
80-81	89	167	224	202	154	138	169	182	184	13	3	46	1570
81-82	74	125	147	169	191	140	223	237	202	31	1	**11**	1550
82-83	73	196	**335**	154	170	87	248	232	75	41	1	**85**	1698
83-84	79	**266**	190	132	214	157	257	**146**	**27**	**0**	19	66	1553
84-85	39	112	236	167	169	109	167	**381**	135	44	3	1	1563
85-86	136	91	227	221	202	154	136	255	128	24	**0**	8	1582
86-87	47	177	209	176	**276**	156	277	270	221	32	9	37	1888
87-88	**202**	153	289	115	274	**326**	289	279	65	2	42	**120**	**2155**
88-89	108	116	255	187	143	122	269	212	159	23	53	60	1706
89-90	51	224	244	209	158	246	**300**	276	166	30	**0**	35	1938
90-91	99	94	197	232	220	158	201	197	**278**	**105**	15	10	1806
91-92	60	287	121	171	141	104	231	292	136	86	**0**	**0**	1630
Moy	**89**	**138**	**216**	**173**	**179**	**161**	**212**	**223**	**154**	**32**	**13**	**36**	**1625**
Max	**202**	**266**	**335**	**307**	**276**	**326**	**300**	**381**	**278**	**105**	**77**	**120**	**2155**
min	**16**	**67**	**71**	**68**	**97**	**79**	**114**	**146**	**27**	**0**	**0**	**1**	**1186**
Σ.pluvio	**0.05**	**0.09**	**0.13**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.13**	**0.14**	**0.09**	**0.02**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Nyamagana

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	57	107	250	**343**	184	185	149	170	210	**15**	**2**	19	1689
73-74	173	162	207	197	216	172	212	292	219	109	**87**	20	2067
74-75	37	136	**213**	**72**	183	**88**	214	213	68	23	12	12	**1270**
75-76	154	154	75	201	110	139	144	164	90	22	5	66	1324
76-77	51	113	219	94	178	147	198	242	118	16	**0**	59	1436
77-78	96	**70**	226	195	115	180	260	208	147	9	**0**	11	1516
78-79	150	130	200	161	**104**	204	**110**	226	219	54	**0**	19	1577
79-80	**17**	104	262	172	224	265	288	188	286	23	2	8	1839
80-81	97	181	231	215	157	141	183	195	199	13	3	50	1665
81-82	73	136	165	176	201	153	251	251	227	36	2	13	1683
82-83	76	211	**373**	161	194	93	261	245	85	43	1	96	1837
83-84	81	297	214	139	235	171	288	**155**	**29**	**0**	17	70	1697
84-85	44	117	255	182	188	119	178	**401**	147	48	3	2	1684
85-86	148	103	257	249	218	166	146	267	143	27	**0**	10	1735
86-87	50	181	232	192	294	169	290	301	233	32	11	42	2026
87-88	**231**	168	318	129	**301**	**364**	317	308	69	2	37	**138**	**2380**
88-89	120	135	289	198	143	130	293	224	152	26	60	70	1839
89-90	58	251	265	234	154	278	**320**	307	190	36	**0**	36	2130
90-91	106	97	221	237	250	171	213	202	**303**	**120**	17	11	1948
91-92	66	**307**	133	192	158	112	252	317	137	100	**0**	**0**	1776
Moy	**94**	**158**	**230**	**187**	**190**	**172**	**228**	**244**	**164**	**38**	**13**	**38**	**1756**
Max	**231**	**307**	**373**	**343**	**301**	**364**	**320**	**401**	**303**	**120**	**87**	**138**	**2380**
min	**17**	**70**	**75**	**72**	**104**	**88**	**110**	**155**	**29**	**0**	**0**	**0**	**1270**
Σ.pluvio	**0.05**	**0.09**	**0.13**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.13**	**0.14**	**0.09**	**0.02**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Muhira

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	54	118	241	**290**	218	170	134	195	**239**	16	0	10	1682
73-74	162	136	247	217	173	138	212	286	207	**91**	**76**	14	1959
74-75	52	121	205	**99**	180	112	195	240	63	21	16	6	**1310**
75-76	169	105	**88**	166	139	121	152	206	107	20	3	70	1346
76-77	72	118	259	147	183	117	205	227	157	9	**0**	69	1564
77-78	75	**77**	227	193	119	187	**324**	190	126	5	**0**	10	1533
78-79	123	173	210	156	132	216	135	243	227	38	1	10	1662
79-80	**14**	110	234	183	210	210	256	210	210	32	1	36	1706
80-81	88	155	208	254	161	132	193	194	209	9	2	67	1670
81-82	91	135	138	186	186	131	186	276	206	28	1	9	1571
82-83	85	180	**321**	173	136	**87**	236	258	74	28	1	65	1642
83-84	69	**248**	185	196	215	151	233	**160**	**31**	**0**	10	58	1556
84-85	33	122	236	168	177	137	201	**348**	119	39	2	**1**	1583
85-86	135	115	230	201	203	177	**130**	297	143	27	**0**	5	1663
86-87	75	191	216	174	**266**	165	231	264	238	27	8	34	1890
87-88	**180**	156	260	123	263	**304**	277	301	66	1	30	**110**	**2071**
88-89	93	164	225	195	195	149	268	210	138	32	48	48	1764
89-90	59	204	186	205	**99**	234	258	273	128	20	**0**	26	1693
Moy	**90**	**146**	**217**	**185**	**181**	**163**	**213**	**243**	**149**	**25**	**11**	**36**	**1659**
Max	**180**	**248**	**321**	**290**	**266**	**304**	**324**	**348**	**239**	**91**	**76**	**110**	**2071**
Min	**14**	**77**	**88**	**99**	**99**	**87**	**130**	**160**	**31**	**0**	**0**	**1**	**1310**
C. Pluvio	**0.05**	**0.09**	**0.13**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.13**	**0.15**	**0.09**	**0.01**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Kaburantwa

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
73-74	176	143	272	254	172	150	218	322	252	**86**	**85**	14	2145
74-75	63	139	205	**139**	174	116	231	299	72	29	15	4	**1488**
75-76	**218**	**92**	122	168	194	115	171	263	126	27	2	84	1582
76-77	99	145	311	208	178	118	231	274	175	10	0	99	1847
77-78	65	97	272	215	124	224	**378**	248	137	3	0	4	1768
78-79	128	224	256	191	171	251	153	266	250	35	1	6	1933
79-80	**15**	127	276	222	221	177	261	250	201	41	1	66	1858
80-81	83	181	233	275	216	138	225	**199**	259	12	1	94	1917
81-82	124	160	142	225	209	120	197	341	188	27	1	8	1741
82-83	122	178	**355**	210	117	**99**	224	293	89	23	0	53	1764
83-84	83	242	206	**297**	208	158	214	201	**41**	**0**	9	63	1724
84-85	36	158	233	169	189	174	254	331	118	38	1	1	1702
85-86	152	118	230	185	230	197	**118**	330	156	36	0	4	1755
86- 87	106	201	245	184	269	182	185	284	267	18	8	33	1981
87-88	**188**	174	257	146	**276**	**310**	289	**358**	69	1	7	**122**	**2196**
88-89	93	183	214	224	201	160	287	213	140	39	52	46	1854
89-90	72	221	153	212	**86**	251	250	287	116	15	0	30	1691
90-91	151	139	210	227	205	174	185	289	**281**	68	7	7	1943
91-92	73	**256**	**121**	167	151	156	242	266	148	56	0	0	1635
Moy	**108**	**167**	**227**	**206**	**189**	**172**	**227**	**280**	**162**	**30**	**10**	**39**	**1817**
Max	**218**	**256**	**355**	**297**	**276**	**310**	**378**	**358**	**281**	**86**	**85**	**122**	**2196**
Min	**15**	**92**	**121**	**139**	**86**	**99**	**118**	**199**	**41**	**0**	**0**	**0**	**1488**
C.pluvio	**0.06**	**0.09**	**0.12**	**0.11**	**0.10**	**0.09**	**0.12**	**0.15**	**0.09**	**0.02**	**0.01**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Kagunuzi

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	113	209	267	230	**259**	131	**103**	268	225	22	**0**	6	1831
73-74	223	160	298	**287**	106	152	281	313	257	**69**	36	22	**2205**
74-75	**237**	107	214	158	191	112	185	233	55	17	13	5	1528
75-76	121	121	**73**	172	175	123	213	217	186	20	8	90	1519
76-77	117	159	204	183	193	185	211	236	121	17	5	**113**	1744
77-78	55	**91**	278	244	166	**257**	**379**	242	94	49	7	28	1889
78-79	94	**234**	221	216	174	192	136	237	199	35	**0**	4	1743
79-80	17	113	221	213	179	128	198	214	234	45	2	29	1594
80-81	111	190	215	212	196	**93**	234	193	240	12	1	90	1789
81-82	115	152	119	174	193	102	158	**357**	190	40	**0**	5	1606
82-83	**109**	220	**360**	273	**57**	145	242	278	99	10	2	39	1835
83-84	68	195	179	221	184	137	173	222	**41**	**0**	19	56	1496
84-85	53	189	202	**113**	197	231	270	321	85	41	**0**	**0**	1702
85-86	128	102	233	131	192	207	133	314	187	31	**0**	**0**	1659
86-87	109	232	217	144	235	187	160	277	201	8	3	22	1793
87-88	154	150	311	124	253	229	309	313	88	**0**	8	56	1995
88-89	89	174	172	197	243	160	226	**179**	136	47	48	58	1727
89-90	60	157	113	197	115	194	211	269	96	1	**0**	18	**1432**
90-91	131	169	173	158	168	144	134	306	**266**	42	1	2	1695
91-92	70	193	104	160	133	176	194	248	138	29	**0**	**0**	1445
Moy	**109**	**166**	**209**	**190**	**180**	**164**	**208**	**262**	**157**	**27**	**8**	**32**	1711
Max	**237**	**234**	**360**	**287**	**259**	**257**	**379**	**357**	**266**	**69**	**48**	**113**	**2205**
Min	**17**	**91**	**73**	**113**	**57**	**93**	**103**	**179**	**41**	**0**	**0**	**0**	**1432**
C. pluvio	**0.06**	**0.10**	**0.12**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.12**	**0.15**	**0.09**	**0.02**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Mpanda à Gatura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	136	**234**	246	222	219	114	**78**	208	182	21	**0**	6	1667
73-74	243	173	315	242	109	157	267	323	256	**71**	29	27	**2212**
74-75	**278**	107	202	171	197	142	153	**175**	58	7	16	5	1512
75-76	90	163	**69**	171	134	150	198	184	171	19	4	74	1427
76-77	141	165	158	149	209	207	184	224	98	23	2	**90**	1649
77-78	48	**78**	281	217	170	**262**	**354**	268	69	67	8	47	1870
78-79	114	195	190	217	140	193	124	273	140	38	**0**	3	1625
79-80	**8**	97	236	216	172	152	176	200	**259**	20	3	2	1540
80-81	127	221	207	196	168	**97**	248	190	217	14	4	65	1754
81-82	106	148	123	153	182	112	187	317	182	37	1	3	1550
82-83	82	233	**367**	**247**	**65**	174	256	242	97	7	3	54	1828
83-84	59	193	185	145	186	140	166	195	**48**	**0**	21	48	**1387**
84-85	62	176	210	**138**	196	212	280	**336**	72	35	**0**	**0**	1718
85-86	111	120	259	153	187	159	149	282	205	17	**0**	2	1643
86-87	70	215	213	146	**242**	212	169	289	167	7	**0**	11	1740
Moy	**112**	**168**	**217**	**186**	**172**	**165**	**199**	**247**	**148**	**26**	**6**	**29**	**1675**
Max	**278**	**234**	**367**	**247**	**242**	**262**	**354**	**336**	**259**	**71**	**29**	**90**	**2212**
Min	**8**	**78**	**69**	**138**	**65**	**97**	**78**	**175**	**48**	**0**	**0**	**0**	**1387**
C.Pluvio	**0.07**	**0.10**	**0.13**	**0.11**	**0.10**	**0.10**	**0.12**	**0.15**	**0.09**	**0.02**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Pluviométrie de la Mpanda à l'axe D

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	114	179	216	180	196	**95**	**76**	166	155	22	0	4	1404
73-74	178	132	237	175	106	122	198	248	188	**53**	**27**	20	**1685**
74-75	**190**	79	167	141	187	119	149	**141**	43	6	22	3	1248
75-76	82	123	**63**	161	119	129	150	160	129	15	3	59	1193
76-77	110	143	120	**117**	173	163	164	200	80	17	1	**70**	1359
77-78	47	**57**	230	170	131	**190**	**300**	214	54	50	5	33	1480
78-79	81	141	142	172	119	174	116	249	123	30	0	8	1354
79-80	**7**	80	214	170	148	118	134	156	**205**	16	2	3	1252
80-81	100	157	176	203	131	96	193	159	156	9	5	67	1453
81-82	80	125	115	133	145	98	141	246	156	31	**0**	2	1272
82-83	58	**187**	**284**	**210**	**78**	135	220	222	77	5	2	39	1515
83-84	44	143	154	120	159	116	142	166	**38**	**0**	17	33	**1133**
84-85	43	135	181	126	158	179	224	**263**	61	24	**0**	**0**	1397
85-86	85	89	222	139	168	145	141	255	141	16	**0**	2	1403
86-87	56	169	174	121	**206**	162	143	217	153	7	**0**	7	1414
Moy	**85**	**129**	**180**	**156**	**148**	**136**	**166**	**204**	**117**	**20**	**6**	**23**	**1371**
Max	**190**	**187**	**284**	**210**	**206**	**190**	**300**	**263**	**205**	**53**	**27**	**70**	**1685**
Min	**7**	**57**	**63**	**117**	**78**	**95**	**76**	**141**	**38**	**0**	**0**	**0**	**1133**
C.Pluvio	**0.06**	**0.09**	**0.13**	**0.11**	**0.11**	**0.10**	**0.12**	**0.15**	**0.09**	**0.01**	**0.00**	**0.02**	**1.00**

Annexe III : Températures

III.1: Plaine de la Rusizi

Station de Bujumbura aéroport

* : données qui manquent

a) Températures minimales mensuelles et annuelles

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	19.6	17.8	18.6	18.7	19.5	19.3	19.5	19.7	18.8	18.6	19.9	19.0	19.0	19.5	19.5	*	*	19.0	19.7	19.3	**19.2**
Févr	19.6	17.8	17.8	18.0	19.5	19.5	19.6	19.0	18.9	18.6	19.3	18.5	20.0	18.7	19.6	*	*	19.7	19.7	19.6	**19.1**
Mars	18.5	19.0	18.2	18.8	19.2	19.9	19.4	19.0	19.7	18.8	20.1	18.9	19.3	18.8	19.8	*	*	19.8	19.7	19.6	**19.3**
Avr	19.0	19.2	18.8	19.1	19.5	19.7	20.1	18.9	19.7	19.7	20.1	19.3	19.6	20.1	20.0	*	*	20.3	20.0	19.5	**19.6**
Mai	18.5	18.9	18.5	19.1	18.7	18.4	19.2	19.4	19.6	19.4	19.5	17.7	19.1	19.4	19.9	*	*	19.3	20.3	19.3	**19.1**
Juin	16.8	18.3	16.7	16.2	17.2	17.4	17.8	17.7	17.4	17.7	18.2	16.4	17.5	17.3	18.5	*	*	17.3	19.1	19.3	**17.6**
Juil	15.2	17.3	16.5	16.4	17.0	16.2	16.2	16.2	16.7	15.8	17.6	17.2	15.5	15.5	16.7	*	*	15.9	17.2	16.1	**16.4**
Août	17.1	16.3	17.6	17.6	17.9	17.7	17.6	17.0	18.1	17.2	18.2	17.1	17.0	16.4	17.5	*	*	18.0	17.3	16.4	**17.3**
Sept	19.1	17.5	18.5	18.7	18.9	17.5	17.9	19.1	17.6	19.5	18.1	18.3	19.0	18.5	19.4	*	*	18.7	18.3	18.9	**18.5**
Oct	18.0	18.5	19.1	18.6	19.3	19.0	19.3	18.8	18.8	19.5	19.1	19.4	20.3	19.4	19.5	*	*	19.2	18.6	19.2	**19.1**
Nov	18.7	19.1	18.0	18.2	19.5	19.0	19.3	18.7	18.6	19.2	18.6	18.9	19.8	19.0	19.7	*	*	19.7	18.8	19.3	**19.0**
Déc	18.2	18.0	18.4	18.9	19.3	19.8	18.9	19.4	19.2	20.0	18.8	18.3	19.5	19.6	19.6	*	*	19.1	19.3	19.2	**19.1**
Moy	**18.2**	**18.1**	**18.1**	**18.2**	**18.8**	**18.6**	**18.7**	**18.6**	**18.6**	**18.7**	**19.0**	**18.3**	**18.8**	**18.5**	**19.1**	*	*	**18.8**	**19.0**	**18.8**	**18.6**

b)Températures maximales mensuelles et annuelles

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	29.0	28.8	28.6	28.8	28.7	29.7	28.7	29.3	29.2	29.7	29.9	28.4	29.8	28.7	28.5	*	*	29.4	29.9	29.6	**29.2**
Févr	30.5	28.8	29.5	28.3	28.9	29.4	29.1	29.9	29.7	30.0	30.6	29.3	28.1	29.7	29.4	*	*	29.6	30.4	29.2	**29.5**
Mars	29.3	29.0	29.1	28.9	28.9	28.9	29.4	29.7	29.0	30.2	29.8	29.3	29.6	28.7	30.0	*	*	29.1	29.5	29.5	**29.3**
Avr	28.8	28.2	28.8	28.7	28.5	28.6	28.3	29.2	30.0	29.3	29.5	29.6	29.0	28.8	29.9	*	*	30.5	28.9	28.5	**29.1**
Mai	28.5	28.1	29.8	28.4	29.5	29.6	28.9	29.0	29.4	29.0	30.4	29.9	29.7	29.4	29.3	*	*	29.5	28.8	29.4	**29.3**
Juin	28.9	28.8	29.0	28.7	29.5	29.4	29.0	29.1	29.9	29.1	30.0	29.6	29.2	28.7	29.6	*	*	30.1	29.6	29.6	**29.3**
Juil	29.0	27.7	28.7	28.9	29.3	29.1	29.2	29.2	29.1	29.4	29.8	28.8	29.4	28.8	30.1	*	*	29.8	28.6	29.3	**29.1**
Août	30.1	29.8	29.1	28.9	29.9	29.8	30.1	30.3	29.8	30.0	29.8	30.1	29.9	30.4	30.8	*	*	30.1	30.1	30.0	**29.9**
Sept	30.8	30.4	28.6	30.3	30.0	30.9	31.7	30.8	30.0	31.2	31.4	31.6	30.3	30.5	30.6	*	*	30.3	30.6	31.4	**30.6**
Oct	30.3	30.5	28.8	29.9	31.6	30.7	30.6	30.4	30.5	29.1	29.6	30.9	31.0	30.1	30.3	*	*	30.2	28.5	30.9	**30.2**
Nov	29.1	28.8	28.8	28.6	28.2	27.5	28.6	28.9	30.1	28.4	29.3	28.5	29.1	27.8	29.6	*	*	29.4	28.3	29.3	**28.8**
Déc	29.1	28.3	28.3	29.4	28.6	27.9	28.8	28.1	28.6	29.3	28.9	28.7	28.7	28.1	30.5	*	*	29.0	28.4	29.3	**28.8**
Moy	**29.5**	**28.9**	**28.9**	**29.0**	**29.3**	**29.3**	**29.4**	**29.5**	**29.6**	**29.6**	**29.9**	**29.6**	**29.5**	**29.1**	**29.9**	*	*	**29.8**	**29.3**	**29.7**	**29.4**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	24.3	23.3	23.6	23.8	24.1	24.5	24.1	24.5	24.0	24.2	24.9	23.7	24.4	24.1	24.0	*	24	24.2	24.8	24.5	**24.2**
Févr	25.1	23.3	23.7	23.2	24.2	24.5	24.4	24.5	24.3	24.3	25.0	23.9	24.1	24.2	24.5	*		24.7	25.1	24.4	**24.3**
Mars	23.9	24.0	23.7	23.9	24.1	24.4	24.4	24.4	24.4	24.5	25.0	24.1	24.5	23.8	24.9	*	23.7	24.5	24.6	24.6	**24.3**
Avr	23.9	23.7	23.8	23.9	24.0	24.2	24.2	24.1	24.9	24.5	24.8	24.5	24.3	24.5	25.0	*	23.8	25.4	24.5	24.0	**24.3**
Mai	23.5	23.5	24.2	23.8	24.1	24.0	24.1	24.2	24.5	24.2	25.0	23.8	24.4	24.4	24.6	*	24	24.4	24.6	24.4	**24.2**
Juin	22.9	23.6	22.9	22.5	23.4	23.4	23.4	23.4	23.7	23.4	24.1	23.0	23.4	23.0	24.1	*	23	23.7	24.4	24.5	**23.5**
Juil	22.1	22.5	22.6	22.7	23.2	22.7	22.7	22.7	22.9	22.6	23.7	23.0	22.5	22.2	23.4	*	*	22.9	22.9	22.7	**22.8**
Août	23.6	23.1	23.4	24.0	23.9	23.8	23.9	23.7	24.0	23.6	24.0	23.6	23.5	23.4	24.2	*	*	24.1	23.7	23.2	**23.7**
Sept	25.0	24.0	23.6	24.3	24.5	24.2	24.8	25.0	23.8	25.4	24.8	25.0	24.7	24.5	25.0	*	*	24.5	24.5	25.2	**24.6**
Oct	24.2	24.5	24.0	23.6	25.5	24.9	25.0	24.6	24.7	24.3	24.4	25.2	25.7	24.8	24.9	*	24.1	24.7	23.6	25.1	**24.6**
Nov	23.9	24.0	23.4	23.8	23.9	23.3	24.1	23.8	24.4	23.8	24.0	23.7	24.5	23.4	24.7	*	24.4	24.6	23.6	24.3	**24.0**
Déc	23.7	23.2	23.4	24.2	24.0	23.9	23.9	23.8	23.9	24.7	23.9	23.9	24.1	23.9	25.1	*	23.9	24.1	23.9	24.3	**24.0**
Moy	**23.8**	**23.6**	**23.5**	**23.6**	**24.1**	**24.0**	**24.1**	**24.1**	**24.1**	**24.1**	**24.5**	**24.0**	**24.2**	**23.9**	**24.5**	*	**23.9**	**24.3**	**24.2**	**24.3**	**24.0**

Station Imbo sems

a) Températures minimales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	17.8	18.8	17.0	17.8	18.1	19.1	19.1	19.1	19.0	18.8	18.6	*	19.1	16.9	18.9	18.8	*	19.2	18.5	19.1	18.7	**18.5**
Févr	18.6	18.8	16.8	17.0	17.3	19.3	19.1	19.5	18.7	18.8	17.8	*	17.7	17.4	18.1	19.1	*	19.3	19	18.8	19.0	**18.4**
Mars	18.5	17.7	18.3	17.5	17.9	18.7	19.3	19.4	19.0	19.6	18.4	*	18.5	18.1	18.1	19.1	*	19.1	19.3	19.0	18.9	**18.7**
Avr	18.3	18.3	18.3	18.1	18.3	19.5	19.2	19.7	19.2	19.4	19.3	*	19.9	18.0	19.5	17.9	20.3	19.2	20	19.4	19.6	**19.1**
Mai	18.2	17.8	18.0	17.9	18.5	18.6	18.0	18.6	19.1	19.3	19.2	*	17.8	17.6	19.0	19.7	19.5	18.9	18.8	19.7	18.4	**18.6**
Juin	17.5	17.1	17.6	16.3	16.2	17.2	16.9	17.3	17.4	17.1	17.6	*	16.1	16.6	16.9	17.8	17.2	17.2	16.6	18.4	18.2	**17.2**
Juil	15.3	15.3	16.3	15.8	15.9	17.1	16.1	16.0	16.0	16.6	15.1	*	*	14.6	19.0	15.9	16.7	16.1	14.7	15.7	14.6	**15.9**
Août	16.6	16.1	15.7	16.6	16.9	16.9	*	17.3	16.7	18.1	16.2	*	16.3	15.4	14.8	15.7	17.7	16.4	16.2	15.8	14.7	**16.3**
Sept	17.5	18.3	16.5	17.4	17.9	18.9	17.7	17.3	18.7	16.4	18.2	*	16.5	18.3	17.2	17.6	17.8	17.5	17.1	16.2	17.3	**17.5**
Oct	18.1	18.1	17.8	18.0	18.4	19.3	18.8	19.0	18.6	18.3	18.6	*	17.8	19.8	18.4	17.8	18.4	17.9	17.7	17.4	17.8	**18.3**
Nov	18.1	18.1	18.3	17.2	18.2	19.1	18.7	19.1	18.8	18.0	*	*	17.0	*	17.9	19.2	18.6	19.2	17.8	17.8	17.9	**18.3**
Déc	18.2	17.4	17.2	17.5	18.7	18.9	19.4	18.8	19.4	18.8	*	*	15.1	18.7	18.8		18.8	19.1	18.4	18.4	17.8	**18.3**
Moy	**17.7**	**17.7**	**17.3**	**17.3**	**17.7**	**18.6**	**18.4**	**18.4**	**18.4**	**18.3**	**17.9**	*	**17.4**	**17.4**	**18.1**	**18.1**	**18.3**	**18.3**	**17.8**	**18.0**	**17.7**	**17.9**

b)Températures maximales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	29.0	29.5	29.1	28.8	29.6	29.8	30.7	*	29.3	29.3	30.1	*	29.9	30.1	29.2	29.7	*	29.1	30.9	31.1	30.3	**29.8**
Févr	28.3	31.4	29.8	29.7	29.0	29.2	30.6	29.5	30.2	30.6	30.3	*	29.7	28.8	30.0	30.5	*	29.5	31.2	31.1	30.2	**30.0**
Mars	29.4	30.5	30.1	29.4	30.1	29.3	29.6	30.2	30.3	29.5	31.3	*	28.7	29.9	30.0	31.3	*	29.9	30	30.2	29.9	**30.0**
Avr	29.6	29.7	28.7	29.4	29.5	28.9	29.1	28.7	30.2	30.4	29.5	*	29.2	29.2	29.6	31.3	30.4	30.1	31.8	29.7	29.9	**29.7**
Mai	29.5	29.2	28.6	30.8	29.2	30.2	30.5	29.3	29.6	29.9	29.4	*	30.4	29.8	30.5	30.6	31.1	30	30.4	30.0	29.9	**29.9**
Juin	29.7	29.6	29.7	30.3	29.9	30.7	30.7	29.5	30.1	30.3	29.5	*	29.8	29.9	29.9	30.5	31.6	30.1	30.9	30.3	30.0	**30.2**
Juil	29.8	30.2	28.7	29.5	30.3	30.6	30.3	30.5	30.3	29.4	29.9	*	*	30.1	30.0	31.4	30.7	30	30.9	29.3	30.0	**30.1**
Août	30.3	31.3	31.3	30.4	30.3	31.5	*	31.4	31.8	30.5	30.9	*	30.5	30.7	31.5	32.1	30.8	31.2	31.1	30.9	30.9	**31.0**
Sept	31.6	31.9	31.5	29.7	31.5	31.8	32.3	33.1	32.1	30.9	32.1	*	32.1	30.7	31.6	32.1	31.4	31.8	31.5	31.5	32.3	**31.7**
Oct	31.2	31.3	31.8	29.8	30.4	32.6	31.7	31.9	31.3	31.4	29.9	*	30.9	30.9	31.2	31.4	31.4	30.7	31.9	29.9	31.8	**31.2**
Nov	28.8	29.7	29.6	29.7	30.2	29.0	29.5	29.3	29.1	30.8	*	*	28.7		28.8	31.0	30.6	31.1	30.8	29.6	30.4	**29.8**
Déc	29.3	29.5	28.7	28.8	30.8	29.1	28.6	28.7	28.3	29.2	*	*	29.2	29.4	29.5	*	28.9	29.9	30.4	29.5	30.1	**29.3**
Moy	**29.7**	**30.3**	**29.8**	**29.7**	**30.1**	**30.2**	**30.3**	**30.2**	**30.2**	**30.2**	**30.3**	*	**29.9**	**30.0**	**30.2**	**31.1**	**30.8**	**30.3**	31.0	**30.3**	**30.5**	**30.2**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	23.4	24.2	23.1	23.3	23.9	24.5	24.9	*	24.4	24.1	24.4	*	24.5	23.5	24.1	24.3	24.7	24.2	24.7	25.1	24.5	**24.2**
Févr	23.5	25.1	23.3	23.4	23.2	24.3	24.9	24.5	24.5	24.7	24.1	*	23.7	23.1	24.1	24.9	24.9	24.4	25.1	25.0	24.6	**24.3**
Mars	24.0	24.1	24.2	23.5	24.0	24.0	24.5	24.8	24.7	24.6	24.9	*	23.6	24.0	24.1	25.2	25.0	24.5	24.7	24.6	24.4	**24.4**
Avr	24.0	24.0	23.5	23.8	23.9	24.2	24.2	24.2	24.7	24.9	24.4	*	24.6	23.6	24.6	25.4	25.4	24.7	25.9	24.6	24.8	**24.5**
Mai	23.9	23.5	23.3	24.4	23.9	24.4	24.3	24.0	24.4	24.6	24.3	*	24.1	23.7	24.8	25.0	25.3	24.5	24.6	24.9	24.2	**24.3**
Juin	23.6	23.4	23.7	23.3	23.1	24.0	23.8	23.6	23.8	23.7	23.6	*	23.0	23.3	23.4	24.2	24.4	23.7	23.8	24.4	24.1	**23.7**
Juil	22.6	22.8	22.5	22.7	23.1	23.9	23.2	23.3	23.2	23.0	22.5	*	*	22.4	24.5	23.7	23.7	23.1	22.8	22.5	22.3	**23.0**
Août	23.5	23.7	23.5	23.5	23.6	24.2	*	24.4	24.3	24.3	23.6	*	23.4	23.1	23.2	24.2	24.3	23.8	23.7	23.4	22.8	**23.7**
Sept	24.6	25.1	24.0	23.6	24.7	25.3	25.0	25.2	25.4	23.7	25.2	*	24.3	24.5	24.4	25.2	24.6	24.7	24.3	23.9	24.8	**24.6**
Oct	24.7	24.7	24.8	23.9	24.4	26.0	25.3	25.5	25.0	24.9	24.3	*	24.4	25.4	24.8	25.0	24.9	24.3	24.8	23.7	24.8	**24.8**
Nov	23.5	23.9	24.0	23.5	24.2	24.1	24.1	24.2	24.0	24.4	*	*	22.9		23.4	25.1	24.6	25.2	24.3	23.7	24.2	**24.1**
Déc	23.8	23.5	23.0	23.2	24.8	24.0	24.0	23.8	23.9	24.0	*	*	22.2	24.1	24.2	25.0	23.9	24.5	24.4	24.0	24.0	**23.9**
Moy	**23.8**	**24.0**	**23.6**	**23.5**	**23.9**	**24.4**	**24.4**	**24.3**	**24.4**	**24.2**	**24.1**	*	**23.7**	**23.7**	**24.1**	**24.7**	**24.6**	**24.3**	**24.4**	**24.1**	**24.1**	**24.1**

Station de Mparambo

a) Températures minimales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	16.0	17.8	15.8	16.3	16.4	18.4	18.1	*	15.0	18.0	16.9	18.9	17.9	17.7	18.4	18.0	*	*	17.7	18.3	17.8	**17.4**
Févr	17.6	18.3	16.0	15.6	16.4	17.6	18.5	*	16.8	17.6	16.8	18.9	16.9	18.3	17.0	18.6	*	*	18.8	18.1	18.1	**17.6**
Mars	17.4	16.5	17.3	16.9	16.9	17.4	18.5	*	17.4	18.2	16.8	19.0	17.2	17.6	17.3	18.4	*	*	18.7	18.4	18.4	**17.7**
Avr	17.5	17.8	17.6	17.4	17.5	18.2	18.3	18.8	18.2	18.6	17.6	19.2	18.0	18.5	18.9	17.8	*	*	19.2	18.8	19.2	**18.3**
Mai	17.4	18.0	17.0	16.6	17.5	17.4	17.7	18.5	18.4	18.8	18.4	18.6	16.8	18.1	18.4	18.3	*	*	18.3	19.1	18.4	**18.0**
Juin	16.4	15.5	17.1	16.3	15.4	16.6	16.1	17.0	17.1	15.8	16.3	17.1	15.1	16.4	16.2	17.4	*	*	15.9	17.6	17.7	**16.5**
Juil	13.0	13.8	14.9	15.1	14.2	14.9	14.1	14.2	15.0	14.5	14.0	15.7	15.4	13.4	13.4	13.8	*	*	13.4	15.4	13.7	**14.3**
Août	15.1	15.0	14.1	15.5	15.6	15.8	14.7	15.1	14.0	15.7	14.6	16.5	15.5	14.1	14.3	16.1	*	*	16.1	14.8	13.8	**15.1**
Sept	*	17.3	16.8	16.1	16.8	17.0	15.9	15.4	17.1	16.1	17.2	16.8	16.4	17.3	16.3	17.9	*	*	17.2	16.3	17.5	**16.7**
Oct	*	17.0	16.5	17.2	16.7	*	*	17.3	17.0	17.5	17.7	18.2	17.9	18.4	17.7	18.4	*	*	17.5	17.5	18.1	**17.5**
Nov	*	17.5	17.2	16.5	17.0	*	*	18.2	17.8	17.0	17.9	17.5	17.7	17.2	17.3	18.9	*	*	18.1	17.2	17.9	**17.6**
Déc	17.5	16.4	15.7	16.7	17.1	*	*	17.1	18.0	17.9	18.3	17.3	18.1	18.8	17.9	18.6	*	*	18.0	17.9	17.4	**17.6**
Moy		**16.7**	**16.3**	**16.4**	**16.5**	**17.0**	**16.9**	**16.8**	**16.8**	**17.1**	**16.9**	**17.8**	**16.9**	**17.2**	**16.9**	**17.7**	*	*	**17.4**	**17.5**	**17.3**	**17.0**

b) Températures maximales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	29.8	30.7	29.9	29.7	31.8	30.9	31.2	*	31.1	30.4	30.5	31.5	29.5	30.6	30.2	29.6	*	*	31.8	30.9	32.0	**30.7**
Févr	29.7	31.9	30.4	31.9	29.3	30.8	31.0	*	31.1	30.7	31.0	32.9	29.2	29.9	30.9	30.9	*	*	31.0	31.9	31.7	**31.0**
Mars	30.7	31.3	30.4	31.3	30.7	30.4	29.9	*	30.4	31.0	32.1	31.2	30.4	31.0	29.9	31.2	*	*	30.7	31.4	31.8	**31.0**
Avr	30.0	30.1	29.7	30.7	29.9	30.0	29.7	29.8	31.3	31.5	30.9	30.6	30.2	30.3	30.1	30.9	*	*	31.8	30.6	31.4	**30.9**
Mai	30.0	29.7	29.7	31.3	30.5	30.7	30.8	29.4	30.7	29.9	30.7	31.0	31.7	29.9	30.2	30.2	*	*	30.9	30.3	30.5	**30.5**
Juin	30.5	29.8	30.7	32.5	31.0	30.4	31.3	29.7	30.5	31.1	31.3	31.7	31.7	30.1	30.7	30.1	*	*	32.2	31	30.7	**31.0**
Juil	31.6	31.0	29.2	31.9	31.2	31.7	31.7	30.9	31.7	31.2	31.8	32.0	30.9	31.2	30.7	31.7	*	*	32.2	30.3	31.6	**31.4**
Août	32.2	31.9	32.8	32.1	31.4	32.3	32.2	32.3	33.4	32.5	33.0	32.3	31.6	31.6	33.0	32.6	*	*	32.6	32.6	32.8	**32.5**
Sept	34.3	32.2	32.7	31.4	32.7	32.7	33.6	33.9	34.0	32.5	34.7	33.4	33.2	31.6	32.6	32.6	*	*	32.3	33.6	33.8	**33.1**
Oct	*	31.7	34.1	32.5	32.6	*	*	32.4	32.6	32.0	31.2	30.9	31.6	33.0	32.0	32.7	*	*	32.9	31.1	32.8	**32.1**
Nov	*	31.3	31.8	32.0	31.5	*	*	31.2	30.6	32.6	31.4	31.8	30.2	31.8	29.7	31.4	*	*	31.4	29.7	31.5	**31.1**
Déc	30.8	30.3	29.7	31.1	31.8	*	*	30.7	29.9	30.2	31.4	30.9	30.6	31.7	29.7	32.6	*	*	30.6	30.9	30.8	**30.8**
Moy		**31.0**	**30.9**	**31.5**	**31.2**	**31.1**	**31.3**	**31.1**	**31.4**	**31.3**	**31.7**	**31.7**	**30.9**	**31.1**	**30.8**	**31.4**	*	*	**31.7**	**31.2**	**31.8**	**31.4**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	22.9	24.3	22.9	23.0	24.1	24.7	24.7	*	23.1	24.2	23.7	25.2	23.7	24.2	24.3	23.8	*	*	24.8	24.6	24.9	**24.1**
Févr	23.7	25.1	23.2	23.8	22.9	24.2	24.8	*	24.0	24.2	23.9	25.9	23.1	24.1	24.0	24.8	*	*	24.9	25.0	24.9	**24.3**
Mars	24.1	23.9	23.9	24.1	23.8	23.9	24.2	*	23.9	24.6	24.5	25.1	23.8	24.3	23.6	24.8	*	*	24.7	24.9	25.1	**24.3**
Avr	23.8	24.0	23.7	24.1	23.7	24.1	24.0	24.3	24.8	25.1	24.3	24.9	24.1	24.4	24.5	24.4	*	*	25.5	24.7	25.3	**24.4**
Mai	23.7	23.9	23.4	24.0	24.0	24.1	24.3	24.0	24.6	24.4	24.6	24.8	24.3	24.0	24.3	24.3	*	*	24.6	24.7	24.4	**24.2**
Juin	23.5	22.7	23.9	24.4	23.2	23.5	23.7	23.4	23.8	23.5	23.8	24.4	23.4	23.3	23.5	23.8	*	*	24.0	24.3	24.2	**23.7**
Juil	22.3	22.4	22.1	23.5	22.7	23.3	22.9	22.6	23.4	22.9	22.9	23.9	23.2	22.3	22.1	22.8	*	*	22.8	22.8	22.6	**22.8**
Août	23.7	23.5	23.5	23.8	23.5	24.1	23.5	23.7	23.7	24.1	23.8	24.4	23.6	22.9	23.7	24.4	*	*	24.4	23.7	23.3	**23.8**
Sept	*	24.8	24.8	23.8	24.8	24.9	24.8	24.7	25.6	24.3	26.0	25.1	24.8	24.5	24.5	25.3	*	*	24.8	25.0	25.7	**24.9**
Oct	*	24.4	25.3	24.9	24.7	*	*	24.9	24.8	24.8	24.5	24.6	24.8	25.7	24.9	25.6	*	*	25.2	24.3	25.5	**24.9**
Nov	*	24.4	24.5	24.3	24.3	*	*	24.7	24.2	24.8	24.7	24.7	24.0	24.5	23.5	25.2	*	*	24.8	23.4	24.7	**24.4**
Déc	24.2	23.4	22.7	23.9	24.5	*	*	24.9	24.0	24.1	24.9	24.1	24.4	25.3	23.8	25.6	*	*	24.3	24.4	24.1	**24.3**
Moy	**23.5**	**23.9**	**23.7**	**24.0**	**23.9**	**24.1**	**24.1**	**24.1**	**24.2**	**24.3**	**24.3**	**24.8**	**23.9**	**24.1**	**23.9**	**24.6**	*	*	24.6	24.3	24.6	**24.1**

III.2: Contreforts

Station de Buhoro

a) Températures minimales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	*	*	*	*	*	14.3	13.7	13.6	13.8	13.6	13.7	13.8	13.5	13.5	13.8	14.5	14.2	14.1	**13.0**	14.0	13.4	**13.8**
Févr	*	*	*	*	11.9	13.9	13.9	14.0	13.7	13.2	12.6	13.7	11.8	14.4	12.6	14.8	14.2	13.9	14.6	13.2	12.8	**13.5**
Mars	*	*	*	*	13.2	13.1	14.5	13.5	12.9	14.0	13.0	14.1	11.7	13.2	12.5	12.7	14.5	13.5	14.5	13.4	12.7	**13.4**
Avr	*	*	*	*	13.6	15.0	14.5	15.2	13.4	14.8	13.0	14.9	12.8	14.4	14.8	11.5	15.5	13.9	15.0	14.7	14.3	**14.2**
Mai	*	*	*	*	13.7	13.2	13.0	14.9	14.6	15.0	8.5	14.1	11.3	13.6	14.4	15.4	14.6	14.0	13.8	15.2	13.6	**13.7**
Juin	*	*	*	*	10.3	11.0	10.9	11.9	11.2	10.7	7.3	11.4	8.4	11.3	11.3	14.0	10.7	11.0	10.4	12.7	13.5	**11.1**
Juil	*	*	*	*	9.0	9.0	8.3	8.9	9.3	9.6	8.2	11.2	9.8	8.1	7.9	10.4	11.2	10.7	7.3	10.5	9.8	**9.4**
Août	*	*	*	*	10.3	10.9	9.6	10.3	8.5	11.7	8.4	11.5	9.6	8.6	9.2	13.6	12.0	10.9	10.2	9.8	8.4	**10.2**
Sept	*	*	*	*	12.2	11.9	10.5	9.6	12.5	11.2	11.0	11.3	10.7	12.5	11.5	15.0	12.6	11.4	11.4	11.6	12.6	**11.7**
Oct	*	*	*	*	12.1	12.5	12.7	12.3	11.8	12.2	8.5	12.9	11.9	13.5	13.4	14.4	13.3	12.3	12.9	12.2	13.5	**12.5**
Nov	*	*	*	*	12.0	13.6	13.4	13.5	13.3	12.3	14.1	12.4	12.7	13.5	13.5	14.8	15.0	14.2	13.4	12.3	13.9	**13.4**
Déc	*	*	*	*	12.4	14.0	14.2	12.6	14.1	13.2	14.4	13.1	12.7	13.5	14.2	14.9	13.7	14.1	13.9	13.2	14.9	**13.7**
Moy	*	*	*	*	**11.9**	**12.7**	**12.4**	**12.5**	**12.4**	**12.6**	**11.1**	**12.9**	**11.4**	**12.5**	**12.4**	**13.8**	**13.5**	**12.8**	**12.5**	**12.7**	**12.8**	**12.5**

b) Températures maximales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	*	*	*	*	*	26.1	27.1	26.6	26.2	26.2	26.7	27.5	26.6	26.7	27.6	27.5	27.1	26.8	28.4	26.9	27.7	**27.0**
Févr	*	*	*	*	25.3	26.3	26.3	27.0	26.6	26.8	27.0	28.4	27.1	27.3	28.1	27.9	27.7	26.7	27.4	28.0	28.0	**27.2**
Mars	*	*	*	*	25.5	26.2	26.1	27.4	27.0	26.7	27.6	27.2	27.2	27.7	26.9	27.7	27.0	27.3	27.5	27.7	28.7	**27.1**
Avr	*	*	*	*	25.4	25.9	25.9	26.3	27.0	27.1	26.3	26.9	26.9	26.8	27.0	27.2	27.4	26.8	28.4	27.1	27.5	**26.8**
Mai	*	*	*	*	25.3	26.7	26.7	25.6	26.3	25.8	26.0	27.3	27.6	26.7	27.0	27.9	27.6	26.7	27.2	26.4	27.7	**26.7**
Juin	*	*	*	*	25.7	26.6	26.8	25.9	26.8	27.0	26.5	27.3	27.6	26.2	27.6	28.4	28.6	27.1	28.5	27.7	26.8	**27.1**
Juil	*	*	*	*	26.5	27.8	27.5	26.9	26.8	27.0	27.0	27.7	27.2	27.9	28.5	27.8	28.3	27.0	28.7	26.5	27.6	**27.5**
Août	*	*	*	*	27.1	28.0	28.2	28.5	28.5	27.7	28.3	28.1	28.7	29.1	29.9	28.5	28.5	28.8	28.9	28.7	29.0	**28.5**
Sept	*	*	*	*	27.7	28.2	28.5	30.3	28.6	27.8	29.5	29.2	29.3	27.7	29.5	27.2	28.2	29.0	28.8	29.2	29.4	**28.7**
Oct	*	*	*	*	27.8	28.6	27.5	28.4	28.0	27.8	27.1	26.9	28.2	28.4	28.4	27.4	28.1	28.0	28.1	26.9	28.0	**27.9**
Nov	*	*	*	*	26.1	25.7	25.9	26.7	26.3	27.5	26.6	27.0	26.5	27.6	26.4	27.8	27.5	28.3	27.0	27.2	26.9	**26.9**
Déc	*	*	*	*	26.5	26.6	25.6	25.8	25.9	26.8	27.7	26.8	27.4	27.2	26.8	28.8	26.6	27.0	26.7	27.7	26.7	**26.9**
Moy	*	*	*	*	**26.3**	**26.9**	**26.8**	**27.1**	**27.0**	**27.0**	**27.2**	**27.5**	**27.5**	**27.4**	**27.8**	**27.8**	**27.7**	**27.5**	**28.0**	**27.5**	**27.8**	**27.3**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	*	*	*	*	*	20.2	20.4	20.1	20.0	19.9	20.2	20.7	20.1	20.1	20.7	21.0	20.7	20.5	20.7	20.5	20.6	**20.4**
Févr	*	*	*	*	18.6	20.1	20.2	20.5	20.2	20.0	19.8	21.1	19.5	20.9	20.4	21.4	21.0	20.3	21.0	20.6	20.4	**20.3**
Mars	*	*	*	*	19.4	19.7	20.3	20.5	20.0	20.4	20.3	20.7	19.5	20.5	19.7	20.2	20.8	20.4	21.0	20.6	20.7	**20.3**
Avr	*	*	*	*	19.5	20.5	20.2	20.8	20.2	21.0	19.7	20.9	19.9	20.6	20.9	19.4	21.5	20.4	21.7	20.9	20.9	**20.5**
Mai	*	*	*	*	19.5	20.0	19.9	20.3	20.5	20.4	17.3	20.7	19.5	20.2	20.7	21.4	21.1	20.4	20.5	20.8	20.7	**20.2**
Juin	*	*	*	*	18.0	18.8	18.9	18.9	19.0	18.9	16.9	19.4	18.0	18.8	19.5	20.4	19.7	19.1	19.5	20.2	20.2	**19.1**
Juil	*	*	*	*	17.8	18.4	17.9	17.9	18.1	18.3	17.6	19.5	18.5	18.0	18.2	19.1	19.8	18.9	18.0	18.5	18.7	**18.4**
Août	*	*	*	*	18.7	19.5	18.9	19.4	18.5	19.7	18.4	19.8	19.2	18.9	19.6	21.1	20.3	19.9	19.6	19.3	18.7	**19.4**
Sept	*	*	*	*	20.0	20.1	19.5	20.0	20.6	19.5	20.3	20.3	20.0	20.1	20.5	21.1	20.4	20.2	20.1	20.4	21.0	**20.2**
Oct	*	*	*	*	20.0	20.6	20.1	20.4	19.9	20.0	17.8	19.9	20.1	21.0	20.9	20.9	20.7	20.2	20.5	19.6	20.8	**20.2**
Nov	*	*	*	*	19.1	19.7	19.7	20.1	19.8	19.9	20.4	19.7	19.6	20.6	20.0	21.3	21.3	21.3	20.2	19.8	20.4	**20.2**
Déc	*	*	*	*	19.5	19.9	19.9	19.2	20.0	19.8	21.1	20.0	20.1	20.4	20.5	21.9	20.2	20.6	20.3	20.5	20.8	**20.3**
Moy	*	*	*	*	**19.1**	**19.8**	**19.7**	**19.8**	**19.7**	**19.8**	**19.2**	**20.2**	**19.5**	**20.0**	**20.1**	**20.7**	**20.6**	**20.1**	**20.3**	**20.1**	**20.3**	**19.9**

III.3 crête

Station de Rwegura

a) Températures minimales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	11.2	12.1	10.8	10.9	11.2	11.4	11.9	11.5	11.4	11.4	10.6	11.7	11.4	11.7	11.7	12.0	12.1	11.7	11.6	11.9	12.2	**11.5**
Févr	11.2	12.6	11.8	10.9	10.9	11.8	12.1	11.2	11.5	11.1	10.9	12.3	11.4	11.5	11.6	12.3	12.4	11.5	12.0	11.9	11.9	**11.7**
Mars	11.6	12.4	11.9	10.6	11.4	11.9	11.7	11.6	11.2	11.2	11.1	12.3	12.0	11.9	11.3	12.4	12.3	11.4	12.0	12.2	12.4	**11.8**
Avr	11.8	12.2	11.5	10.1	11.3	11.9	11.9	11.3	11.7	11.1	10.4	11.9	12.0	11.7	11.7	12.7	12.6	11.9	12.5	12.1	12.5	**11.8**
Mai	11.7	11.9	11.6	10.9	11.7	11.6	11.3	11.2	11.7	10.5	9.8	12.3	11.8	11.5	11.7	12.5	12.3	11.6	11.9	12.5	12.2	**11.6**
Juin	11.3	11.2	11.3	10.5	10.7	10.9	10.9	10.5	10.6	9.8	10.4	11.5	10.6	11.0	10.0	11.5	11.1	10.3	11.1	11.7	11.6	**10.9**
Juil	12.9	10.8	10.6	10.0	10.4	10.6	10.1	10.4	10.0	9.9	*	11.2	10.8	10.1	10.1	11.6	11.1	10.2	10.2	10.6	10.3	**10.6**
Août	11.5	11.7	10.6	10.1	11.2	11.0	11.5	11.8	11.0	10.5	*	11.3	11.4	11.1	11.6	12.1	11.8	11.2	11.5	11.7	10.9	**11.3**
Sept	11.9	11.7	10.5	10.0	11.1	12.0	11.7	12.0	11.8	10.3	11.3	11.4	11.4	11.6	11.1	12.4	11.9	11.6	11.7	12.0	11.9	**11.5**
Oct	12.0	12.1	10.9	11.2	12.0	12.6	11.7	12.2	11.6	11.3	10.2	11.6	11.8	12.1	11.4	12.5	12.2	11.8	11.8	11.1	11.9	**11.7**
Nov	11.7	11.5	10.8	11.3	11.5	11.4	11.1	11.3	11.3	10.4	11.1	12.2	11.2	11.6	11.8	12.1	11.7	11.9	11.9	11.7	11.5	**11.5**
Déc	12.0	11.0	10.8	11.0	11.4	11.7	11.4	10.9	11.0	10.8	11.6	11.1	11.6	11.4	11.9	12.3	11.3	11.7	11.6	11.9	11.5	**11.4**
Moy	**11.7**	**11.8**	**11.1**	**10.6**	**11.2**	**11.6**	**11.4**	**11.3**	**11.2**	**10.7**	**10.7**	**11.7**	**11.5**	**11.4**	**11.3**	**12.2**	**11.9**	**11.4**	**11.7**	**11.8**	**11.7**	**11.4**

b) Températures maximales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	20.0	21.4	20.1	20.0	20.4	19.8	20.6	20.0	21.1	20.8	20.9	21.7	19.8	20.4	20.6	20.9	20.1	19.3	20.9	**21.1**	**20.8**	**20.5**
Févr	19.5	22.0	20.5	20.1	19.4	20.4	20.5	20.6	21.2	20.8	20.7	21.9	20.9	19.5	21.2	21.7	21.4	19.8	20.6	**22.0**	**20.5**	**20.7**
Mars	19.9	20.5	19.8	19.6	20.5	19.9	19.7	21.3	20.7	20.0	20.6	21.4	21.0	20.7	20.4	21.8	20.5	20.1	20.4	**21.6**	**20.9**	**20.5**
Avr	19.1	19.0	19.3	19.4	19.6	19.2	19.3	19.6	20.5	19.9	19.6	19.8	19.8	19.2	19.3	21.4	20.0	18.9	20.9	**20.5**	**20.2**	**19.7**
Mai	18.2	18.8	18.5	18.9	18.6	19.2	19.0	19.0	19.1	19.2	18.8	20.1	20.1	18.9	19.4	19.8	19.5	18.4	20.4	**19.3**	**19.3**	**19.2**
Juin	18.5	19.4	18.3	18.6	18.7	19.1	18.8	18.9	19.9	19.9	19.3	20.4	19.7	18.8	19.6	19.8	19.6	18.3	20.7	**20.3**	**19.3**	**19.3**
Juil	19.3	19.9	17.1	18.7	19.0	19.3	19.5	19.9	20.0	19.8	19.6	20.0	19.1	19.7	19.1	21.2	19.4	18.8	20.5	**18.8**	**19.7**	**19.4**
Août	20.2	20.8	20.5	19.6	19.2	19.9	20.5	21.4	20.6	20.3	*	20.3	20.7	20.3	22.3	21.1	19.6	20.1	21.2	**21.1**	**21.4**	**20.6**
Sept	20.7	20.8	20.3	18.7	20.1	20.6	21.2	22.7	21.2	20.4	*	21.4	21.8	19.9	21.5	21.7	20.2	20.3	21.1	**21.7**	**21.8**	**20.9**
Oct	20.5	20.3	20.7	19.1	21.0	21.2	20.4	21.8	21.1	20.6	20.8	20.5	20.4	20.5	21.7	21.5	20.0	19.8	21.1	**19.7**	**20.9**	**20.6**
Nov	19.5	19.8	20.1	19.9	20.1	19.3	19.4	20.3	19.8	20.8	19.0	21.0	18.9	20.3	20.3	19.9	19.9	20.5	20.4	**19.9**	**20.1**	**20.0**
Déc	20.6	19.5	19.8	19.5	20.2	20.3	19.6	20.2	20.2	20.8	19.9	20.1	20.3	20.1	20.4	21.9	19.1	20.0	20.1	**20.0**	**19.6**	**20.1**
Moy	**19.7**	**20.2**	**19.6**	**19.3**	**19.7**	**19.9**	**19.9**	**20.5**	**20.5**	**20.3**	**19.9**	**20.7**	**20.2**	**19.9**	**20.5**	**21.1**	**19.9**	**19.5**	**20.7**	**20.5**	**20.4**	**20.1**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	15.6	16.8	15.5	15.5	15.8	15.6	16.3	15.8	16.3	16.1	15.8	16.7	15.6	16.1	16.2	16.5	16.1	15.5	16.3	16.5	16.5	**16.1**
Févr	15.4	17.3	16.2	15.5	15.2	16.1	16.3	15.9	16.4	16.0	15.8	17.1	16.2	15.5	16.4	17.0	16.8	15.7	16.3	17.0	16.2	**16.2**
Mars	15.8	16.5	15.9	15.1	16.0	15.9	15.7	16.5	16.0	15.6	15.9	16.9	16.3	16.3	15.9	17.1	16.4	15.8	16.2	16.9	16.7	**16.2**
Avr	15.5	15.6	15.4	14.8	15.5	15.6	15.6	15.5	16.1	15.5	15.0	15.9	15.9	15.5	15.5	17.1	16.3	15.4	16.7	16.3	16.4	**15.8**
Mai	15.0	15.4	15.1	14.9	15.2	15.4	15.2	15.1	15.4	14.9	14.3	16.2	16.0	15.2	15.6	16.2	15.9	15.0	16.2	15.9	15.8	**15.4**
Juin	14.9	15.3	14.0	14.6	14.7	15.0	14.9	14.7	15.3	14.9	14.9	16.0	15.2	14.9	14.3	15.7	15.4	14.3	15.9	16.0	15.5	**15.1**
Juil	16.1	15.4	13.9	14.4	14.7	15.1	14.8	15.2	15.0	14.9	*	15.6	15.0	14.9	14.6	16.4	15.3	14.5	15.4	14.7	15	**15.0**
Août	15.9	16.3	15.6	14.9	15.2	15.5	16.0	16.6	15.8	15.4	*	15.8	16.1	15.7	17.0	16.6	15.7	15.7	16.4	16.4	16.2	**15.9**
Sept	16.3	16.3	15.4	14.4	15.6	16.3	16.5	17.4	16.5	15.5	16.1	16.4	16.6	15.8	16.3	17.1	16.1	16.0	16.4	16.9	16.9	**16.2**
Oct	16.3	16.2	15.8	15.2	16.5	16.9	16.1	17.0	16.4	16.0	14.6	16.1	16.1	16.3	16.6	17.0	16.1	15.8	16.5	15.4	16.4	**16.2**
Nov	15.6	15.7	15.5	15.6	15.8	15.4	15.3	15.8	15.6	15.6	15.5	16.6	15.1	16.0	16.1	16.0	15.8	16.2	16.2	15.8	15.8	**15.8**
Déc	16.3	15.3	15.3	15.3	15.8	16.0	15.5	15.6	15.6	15.2	16.1	15.6	16.0	15.8	16.2	17.1	15.2	15.9	15.9	16.0	15.6	**15.8**
Moy	**15.7**	**16.0**	**15.3**	**15.0**	**15.5**	**15.7**	**15.7**	**15.9**	**15.9**	**15.5**	**15.4**	**16.2**	**15.8**	**15.7**	**15.9**	**16.7**	**15.9**	**15.5**	**16.2**	**16.2**	16.1	**15.8**

Station de Teza

a)Températures minimales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	10.1	11.0	8.8	9.9	9.9	11.4	12.2	11.9	11.0	9.5	10.8	11.9	11.3	10.8	11.7	11.9	*	*	11.1	11.5	11.1	**10.9**
Févr	10.9	11.3	9.3	9.1	9.2	11.6	11.8	11.9	11.7	11.0	10.8	11.7	10.9	11.6	10.7	12.0	*	*	11.5	11.0	11.5	**11.0**
Mars	10.4	10.6	10.5	10.1	10.2	12.0	12.1	10.6	10.4	11.3	10.7	12.2	11.0	11.7	10.7	12.1	*	*	11.7	11.2	11.0	**11.1**
Avr	11.1	11.5	10.4	10.0	10.8	11.6	12.4	12.5	13.6	12.0	11.9	12.3	11.8	12.0	12.4	12.5	*	*	12.7	12.1	12.6	**11.9**
Mai	11.3	10.9	10.6	10.3	10.8	11.8	11.3	12.4	11.6	11.9	12.1	12.0	11.1	11.5	12.1	12.0	*	*	11.7	12.9	11.1	**11.5**
Juin	9.9	9.0	9.7	8.5	8.4	10.0	10.0	10.7	10.1	9.4	10.0	10.6	9.5	10.2	9.7	10.6	*	*	9.7	10.7	10.7	**9.9**
Juil	8.4	7.3	8.9	9.1	8.1	9.5	9.3	8.1	*	9.5	8.8	9.0	9.5	8.5	8.7	10.2	*	*	8.6	9.3	8.5	**8.9**
Août	9.2	9.1	8.1	9.5	9.0	10.5	9.8	10.9	*	10.2	9.7	10.6	10.2	10.0	10.1	11.1	*	*	10.6	9.7	8.7	**9.8**
Sept	10.2	9.6	8.8	10.2	9.7	11.1	10.3	10.1	*	10.5	11.1	10.6	10.4	10.9	10.5	11.3	*	*	11.0	10.5	10.8	**10.4**
Oct	10.6	9.8	9.8	10.9	9.9	11.4	11.5	12.0	*	11.2	10.6	11.5	11.4	11.9	10.8	11.5	*	*	11.1	10.7	10.7	**11.0**
Nov	10.7	10.1	10.2	10.8	9.8	11.3	11.0	11.7	*	11.3	11.4	10.9	10.9	11.5	11.2	12.0	*	*	11.9	10.6	11.3	**11.0**
Déc	10.1	8.8	9.4	10.6	10.5	11.7	11.8	10.8	*	11.0	11.5	11.2	10.9	11.2	10.8	11.8	*	*	11.2	11.8	9.8	**10.8**
Moy	**10.2**	**9.9**	**9.5**	**9.9**	**9.7**	**11.2**	**11.1**	**11.1**	**11.4**	**10.7**	**10.8**	**11.2**	**10.7**	**11.0**	**10.8**	**11.6**	*	*	**11.1**	**11.0**	**10.7**	**10.7**

b) Températures maximales mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	21.3	22.0	20.7	20.9	21.5	21.2	21.5	21.1	21.0	21.2	21.2	21.9	20.2	21.1	20.9	20.8	*	*	21.1	21.0	20.9	**21.1**
Févr	20.5	22.5	21.4	21.4	20.9	21.7	21.0	21.0	21.6	21.0	21.4	22.5	20.9	20.6	21.0	21.7	*	*	21.1	21.6	21.2	**21.3**
Mars	21.5	21.7	21.1	21.1	22.3	21.2	20.5	21.7	21.3	21.5	22.4	21.0	21.2	21.3	20.5	22.7	*	*	20.7	21.4	21.1	**21.4**
Avr	20.4	20.6	20.5	20.0	21.7	20.3	20.4	20.3	21.0	20.6	21.1	20.8	20.1	20.3	19.9	21.7	*	*	21.3	20.5	20.8	**20.6**
Mai	20.0	20.2	20.0	20.0	20.4	20.8	19.7	18.5	21.6	20.6	20.1	20.7	20.9	19.7	19.5	20.2	*	*	20.5	19.5	19.8	**20.1**
Juin	19.9	20.6	19.6	20.0	20.7	20.6	19.7	19.5	20.6	20.4	20.3	21.0	20.3	19.9	20.0	20.5	*	*	20.7	20.6	19.6	**20.2**
Juil	20.9	21.5	18.7	20.0	21.0	21.2	20.6	20.6	*	20.8	21.0	20.3	19.8	21.5	20.4	21.7	*	*	20.9	19.4	20.3	**20.6**
Août	22.0	22.5	21.6	21.4	21.4	21.7	21.8	22.3	*	21.3	22.1	21.0	21.6	22.4	22.8	22.2	*	*	21.8	21.3	22.0	**21.8**
Sept	22.9	22.4	21.4	20.4	22.4	22.6	22.5	24.3	*	21.6	22.9	22.3	22.7	21.9	22.3	22.3	*	*	21.4	22.0	23.0	**22.3**
Oct	22.5	21.7	22.0	20.7	22.5	23.3	22.0	23.9	*	21.6	21.0	21.0	21.2	22.1	22.1	22.1	*	*	21.6	20.4	22.4	**21.9**
Nov	21.2	20.9	20.9	21.3	21.4	20.9	20.8	21.1	*	21.2	20.5	21.0	20.3	21.1	20.1	20.7	*	*	20.5	20.0	21.3	**20.8**
Déc	21.8	20.8	20.6	20.8	21.3	21.6	20.7	20.7	*	21.2	21.8	20.5	20.5	20.9	20.1	22.4	*	*	20.2	20.5	20.8	**21.0**
Moy	**21.2**	**21.5**	**20.7**	**20.7**	**21.5**	**21.4**	**20.9**	**21.3**	**21.2**	**21.1**	**21.3**	**21.2**	**20.8**	**21.1**	**20.8**	**21.6**	*	*	**21.0**	**20.7**	**21.1**	**21.1**

c) Températures moyennes mensuelles et annuelles

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy
Janv	15.7	16.5	14.8	15.4	15.7	16.3	16.9	16.5	16.4	15.4	16.0	16.9	15.8	16.0	16.3	16.4	*	*	16.3	16.3	16.0	**16.1**
Févr	15.7	16.9	15.4	15.3	15.1	16.7	16.4	16.5	16.7	16.0	16.1	17.1	15.9	16.1	15.9	16.9	*	*	16.3	16.3	16.4	**16.2**
Mars	16.0	16.2	15.8	15.6	16.3	16.6	16.3	16.2	15.9	16.4	16.6	16.6	16.1	16.5	15.6	17.4	*	*	16.2	16.3	16.1	**16.2**
Avr	15.8	16.1	15.5	15.8	16.3	16.0	16.4	16.4	17.3	16.3	16.5	16.6	16.0	16.2	16.2	17.1	*	*	17.0	16.3	16.7	**16.3**
Mai	15.7	15.6	15.3	15.2	15.6	16.3	15.5	15.5	16.6	16.3	16.1	16.4	16.0	15.6	15.8	16.5	*	*	16.1	16.2	15.6	**15.9**
Juin	14.9	14.8	14.7	14.3	14.6	15.3	14.9	15.1	15.4	14.9	15.2	15.8	14.9	15.1	14.9	15.6	*	*	15.2	15.7	15.2	**15.1**
Juil	14.7	14.4	13.8	14.6	14.6	15.4	15.0	14.4	15.0	15.2	14.9	14.7	14.7	15.0	14.6	16.0	*	*	14.8	14.4	14.4	**14.8**
Août	15.6	15.8	14.9	15.5	15.2	16.1	15.0	16.6	15.8	15.8	15.9	15.8	15.9	16.2	16.5	16.7	*	*	16.2	15.5	15.4	**15.8**
Sept	16.6	16.0	15.1	15.3	16.1	16.9	16.4	17.2	16.5	16.1	17.0	16.5	16.6	16.4	16.4	16.8	*	*	16.2	16.3	16.9	**16.4**
Oct	16.6	15.0	15.9	15.8	16.2	17.4	16.8	18.0	16.4	16.4	15.8	16.3	16.3	17.0	16.5	16.8	*	*	16.4	15.6	16.6	**16.4**
Nov	16.0	15.5	15.6	16.1	15.6	16.1	15.9	16.4	15.6	16.2	16.0	16.0	15.6	16.3	15.7	16.4	*	*	16.2	15.3	16.3	**15.9**
Déc	16.0	14.8	15.0	15.7	15.9	16.7	16.3	15.8	15.6	16.1	16.7	15.9	15.7	16.1	15.5	17.1	*	*	15.5	16.2	15.3	**15.9**
Moy	**15.8**	**15.6**	**15.2**	**15.4**	**15.6**	**16.3**	**16.0**	**16.2**	**16.1**	**15.9**	**16.1**	**16.2**	**15.8**	**16.0**	**15.8**	**16.6**	*	*	**16.0**	**15.9**	**15.9**	**15.9**

Annexe IV : Débits mensuels (en mm) des rivières

Rivière Nyakagunda (1972-1992)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	38	47	53	60	53	47	48	49	55	42	32	31	556
73-74	50	50	53	53	53	45	56	55	55	50	45	37	601
74-75	39	47	55	43	51	39	54	51	40	35	33	32	518
75-76	48	47	38	50	44	44	50	48	44	38	32	35	518
76-77	39	45	51	44	51	46	53	54	45	39	33	37	536
77-78	44	41	52	55	49	45	58	53	47	38	28	29	539
78-79	47	50	51	51	47	48	46	38	40	36	35	34	522
79-80	26	29	44	40	43	50	54	68	78	58	33	26	550
80-81	25	34	56	73	71	58	77	54	76	49	33	31	637
81-82	31	33	33	62	50	46	47	62	77	65	54	50	611
82-83	46	53	70	62	50	42	60	66	57	47	44	44	641
83-84	38	48	45	52	49	42	63	56	48	38	38	35	552
84-85	46	50	59	60	64	53	68	93	71	61	51	47	724
85-86	48	49	48	54	62	49	58	84	101	65	56	48	722
86-87	57	59	129	119	119	101	138	119	152	113	95	78	1,279
87-88	68	76	109	101	93	116	132	132	103	68	61	60	1,118
88-89	52	51	61	58	62	59	70	90	80	56	49	45	733
89-90	42	63	70	78	66	61	97	78	76	47	41	29	749
90-91	27	32	44	45	46	39	71	72	79	50	32	25	562
91-92	20	57	100	58	31	29	36	41	49	36	24	17	499
Moy	42	48	61	61	58	53	67	68	69	52	42	39	658
Max	68	76	129	119	119	116	138	132	152	113	95	78	1,279
Min	20	29	33	40	31	29	36	38	40	35	24	17	499

Rivière Nyamagana (1972-1992)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	41	49	54	60	54	48	50	51	55	45	36	35	578
73-74	51	52	54	54	54	47	57	55	56	51	47	41	618
74-75	42	49	55	45	52	41	55	52	43	38	37	36	545
75-76	49	49	41	51	46	46	51	49	47	41	36	76	582
76-77	42	47	52	46	52	47	54	55	47	42	37	40	561
77-78	46	44	53	56	51	47	58	54	49	41	32	34	563
78-79	48	52	52	53	49	49	48	44	46	42	41	40	564
79-80	33	36	50	44	50	57	63	70	76	60	34	24	597
80-81	20	30	46	62	65	52	61	68	104	52	32	37	630
81-82	38	36	34	42	47	48	69	78	56	38	35	35	556
82-83	43	55	71	74	66	56	76	96	86	63	51	47	782
83-84	27	34	37	47	43	37	37	64	63	46	34	37	505
84-85	30	35	47	48	48	42	54	136	93	62	50	42	688
85-86	40	40	48	52	59	56	65	81	81	50	43	37	653
86-87	33	46	64	61	67	64	73	80	106	71	54	47	766
87-88	48	62	72	65	80	96	117	109	90	67	54	55	918
88-89	53	49	40	70	77	64	73	63	70	60	41	27	686
89-90	27	33	37	41	52	50	79	67	79	41	25	25	556
90-91	22	25	71	52	55	41	66	84	67	43	32	31	587
91-92	30	31	32	35	44	39	44	66	53	42	38	22	475
Moy	38	43	51	53	56	51	62	71	68	50	39	38	621
Max	53	62	72	74	80	96	117	136	106	71	54	76	918
Min	20	25	32	35	43	37	37	44	43	38	25	22	475

Rivière Muhira (1992-1990)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	52	58	60	65	61	55	59	58	62	54	50	50	**684**
73-74	**59**	**60**	60	61	61	54	63	61	62	58	57	53	**709**
74-75	53	58	61	56	60	50	62	59	54	51	50	50	**663**
75-76	57	58	52	60	56	53	59	57	57	52	50	52	**664**
76-77	53	57	59	56	60	54	61	61	57	52	50	52	**674**
77-78	55	55	60	62	59	54	64	60	58	52	48	48	**675**
78-79	57	60	59	60	58	55	58	57	62	47	46	43	**663**
79-80	41	41	51	53	55	54	65	68	71	**69**	**60**	**55**	**683**
80-81	52	54	56	**89**	75	64	79	71	93	50	43	42	**768**
81-82	38	40	42	54	**79**	60	69	86	86	69	55	47	**725**
82-83	42	56	**76**	73	74	66	82	82	79	58	51	45	**785**
83-84	39	52	61	65	66	59	79	76	64	49	45	43	**696**
84-85	30	36	55	46	45	39	59	**133**	88	48	**25**	**20**	**625**
85-86	24	**20**	**32**	42	52	50	52	97	**96**	45	32	26	**569**
86-87	**22**	38	54	**38**	45	39	66	70	89	67	37	27	**593**
87-88	27	39	62	48	55	62	77	98	78	63	47	42	**698**
88-89	38	26	46	68	70	**72**	**112**	73	78	59	45	39	**725**
89-90	34	37	42	51	**41**	**38**	**46**	**44**	**44**	**38**	39	39	**493**
Moy	**43**	**47**	**55**	**58**	**60**	**54**	**67**	**73**	**71**	**55**	**46**	**43**	**672**
Max	**59**	**60**	**76**	**89**	**79**	**72**	**112**	**133**	**96**	**69**	**60**	**55**	**785**
Min	**22**	**20**	**32**	**38**	**41**	**38**	**46**	**44**	**44**	**38**	**25**	**20**	**493**

Rivière Kaburantwa (1973-1992)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
73-74	62	63	63	64	64	57	65	63	65	62	61	59	**748**
74-75	58	62	63	61	63	55	64	62	60	57	58	57	**721**
75-76	61	62	58	63	61	57	63	61	61	58	57	59	**721**
76-77	58	61	62	61	63	57	64	63	62	58	58	59	**727**
77-78	60	60	62	65	63	57	66	62	62	58	56	57	**728**
78-79	61	63	62	64	62	58	62	61	69	49	40	35	**685**
79-80	37	36	43	50	60	60	95	107	105	83	65	58	**798**
80-81	50	51	52	66	60	60	64	62	66	61	63	63	**718**
81-82	57	57	58	66	72	57	68	85	93	71	60	54	**798**
82-83	51	56	70	84	73	55	69	86	80	61	52	47	**785**
83-84	30	39	40	44	52	**41**	**48**	**48**	**38**	**27**	**24**	**21**	**451**
84-85	**22**	**30**	**38**	**37**	**36**	45	54	112	90	68	59	52	**640**
85-86	54	50	58	64	75	73	66	95	94	66	54	47	**796**
86-87	47	61	73	77	89	86	105	102	**127**	**99**	**86**	**73**	**1026**
87-88	**71**	**73**	**88**	**88**	**97**	**98**	**122**	**122**	102	75	68	66	**1070**
88-89	60	68	69	73	80	76	86	91	85	65	59	51	**863**
89-90	50	51	58	71	67	66	101	103	96	72	64	57	**857**
90-91	58	57	63	72	76	71	76	84	92	80	65	55	**847**
91-92	47	71	65	70	76	76	89	86	88	66	59	52	**846**
Moy	**52**	**56**	**60**	**65**	**68**	**63**	**75**	**82**	**81**	**65**	**58**	**54**	**780**
Max	**71**	**73**	**88**	**88**	**97**	**98**	**122**	**122**	**127**	**99**	**86**	**73**	**1070**
Min	**22**	**30**	**38**	**37**	**36**	**41**	**48**	**48**	**38**	**27**	**24**	**21**	**451**

Rivière Kagunuzi (1972-1992)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	16	21	**65**	64	**92**	51	43	62	**102**	55	37	26	**634**
73-74	40	29	55	59	42	**27**	**42**	**89**	100	49	35	19	**586**
74-75	18	**16**	**18**	**17**	53	35	53	56	**36**	**25**	16	13	**355**
75-76	42	46	42	52	47	43	53	50	49	32	14	24	**494**
76-77	38	45	45	52	50	45	53	55	41	27	13	25	**489**
77-78	28	34	62	56	48	54	73	54	41	33	22	19	**525**
78-79	36	51	56	56	47	51	44	54	54	38	15	**9**	**511**
79-80	**14**	35	48	60	50	48	50	**50**	56	41	17	13	**481**
80-81	36	47	52	52	49	33	60	57	58	35	**13**	24	**516**
81-82	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
82-83	36	41	51	**71**	75	69	**79**	85	91	**79**	**73**	**71**	**821**
83-84	57	61	58	58	71	57	64	62	59	36	33	37	**653**
84-85	35	32	39	43	61	60	67	85	86	68	57	38	**672**
85-86	40	33	42	47	55	55	57	80	63	51	43	34	**600**
86-87	38	42	52	69	56	**72**	75	77	93	75	63	54	**764**
87-88	59	59	64	64	64	59	67	70	76	67	60	60	**769**
88-89	**60**	**63**	60	61	65	64	68	68	76	66	57	51	**760**
89-90	**60**	**63**	60	61	65	64	68	68	76	66	57	51	**760**
90-91	49	41	42	42	**35**	32	42	64	64	61	46	44	**561**
91-92	39	49	42	37	47	43	54	60	61	51	45	44	**573**
Moy	**39**	**43**	**50**	**54**	**56**	**51**	**58**	**66**	**67**	**50**	**38**	**34**	**607**
Max	**60**	**63**	**65**	**71**	**92**	**72**	**79**	**89**	**102**	**79**	**73**	**71**	**821**
Min	**14**	**16**	**18**	**17**	**35**	**27**	**42**	**50**	**36**	**25**	**13**	**9**	**355**

Rivière Mpanda à Gatura (1972-1987)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	51	53	52	53	53	47	52	52	53	50	**51**	50	**617**
73-74	52	53	52	54	52	48	54	52	54	**51**	**51**	**51**	**623**
74-75	**52**	52	52	53	53	47	53	51	51	49	**51**	**51**	**614**
75-76	50	52	51	53	53	47	53	51	53	50	**51**	**51**	**616**
76-77	51	53	51	52	53	48	53	51	52	50	**51**	**51**	**616**
77-78	50	52	52	53	53	49	54	51	52	50	**51**	**51**	**619**
78-79	50	53	51	53	**62**	56	52	67	**109**	37	37	33	**661**
79-80	**29**	**30**	**37**	49	45	46	56	**50**	74	37	33	32	**518**
80-81	47	**66**	46	52	48	40	**78**	83	101	47	40	49	**698**
81-82	45	55	40	40	**43**	**38**	49	62	72	42	38	36	**559**
82-83	35	45	**81**	**75**	48	46	71	88	67	45	39	38	**679**
83-84	30	42	46	48	53	43	63	70	**46**	**29**	**31**	**27**	**529**
84-85	38	50	49	44	49	62	72	**127**	72	46	40	36	**685**
85-86	37	37	46	**40**	50	45	**48**	72	80	46	37	32	**571**
86-87	32	43	52	43	57	**65**	58	65	60	46	39	35	**596**
Moy	**43**	**49**	**50**	**51**	**51**	**49**	**58**	**66**	**66**	**45**	**43**	**42**	**613**
Max	**52**	**66**	**81**	**75**	**62**	**65**	**78**	**127**	**109**	**51**	**51**	**51**	**698**
Min	**29**	**30**	**37**	**40**	**43**	**38**	**48**	**50**	**46**	**29**	**31**	**27**	**518**

Rivière Mpanda à l'axe D (1972-1987)

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	23	**28**	26	26	27	19	23	26	26	21	17	17	**280**
73-74	26	26	28	29	23	23	29	28	28	24	20	20	**303**
74-75	**29**	23	26	25	26	21	24	24	**19**	18	18	18	**272**
75-76	21	24	24	25	25	22	27	24	26	22	18	20	**277**
76-77	22	25	24	24	26	25	26	26	22	20	18	20	**277**
77-78	19	23	26	27	26	26	30	26	22	22	20	19	**285**
78-79	22	27	25	26	26	24	23	**24**	26	19	17	17	**277**
79-80	16	10	25	**15**	**14**	**14**	**22**	29	28	18	**11**	**11**	**214**
80-81	11	17	25	30	28	18	43	56	48	19	17	16	**328**
81-82	15	22	23	28	34	22	29	44	40	23	19	19	**317**
82-83	12	17	**42**	**57**	31	24	45	57	46	15	12	15	**374**
83-84	14	**21**	22	21	27	21	28	35	24	**13**	15	15	**255**
84-85	**3**	15	**21**	22	15	39	50	**111**	56	24	19	15	**387**
85-86	17	11	28	31	**59**	52	45	84	**82**	29	19	16	**472**
86-87	16	21	42	41	53	**65**	**59**	73	80	**40**	**28**	**24**	**541**
Moy	**18**	**21**	**27**	**29**	**29**	**28**	**34**	**44**	**38**	**22**	**18**	**17**	**324**
Max	**29**	**28**	**42**	**57**	**59**	**65**	**59**	**111**	**82**	**40**	**28**	**24**	**541**
Min	**3**	**10**	**21**	**15**	**14**	**14**	**22**	**24**	**19**	**13**	**11**	**11**	**214**

Annexe V.1: Evapotranspiration (ETP et ETR) des bassins

ETP (mm) de la Nyakagunda

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	75	75	72	74	75	**78**	75	75	73	67	**62**	69	870
73-74	**75**	75	74	73	73	74	74	75	73	67	61	69	863
74-75	75	**76**	74	72	73	75	74	75	74	68	**63**	69	867
75-76	73	75	74	74	75	73	74	**75**	74	66	62	69	863
76-77	75	75	69	72	76	75	72	76	73	66	**64**	71	863
77-78	76	**78**	71	72	77	76	75	74	73	67	**61**	67	867
78-79	72	74	71	72	73	74	76	**78**	74	66	**60**	70	861
79-80	75	77	74	69	72	74	73	75	76	67	**62**	65	860
80-81	78	73	71	72	72	73	75	**79**	74	65	**62**	71	867
81-82	73	77	76	74	76	74	78	74	62	59	**61**	67	**850**
82-83	76	60	74	78	77	81	77	77	76	68	68	70	881
83-84	78	75	74	74	74	71	72	74	72	**63**	65	70	861
84-85	75	75	71	74	74	**78**	77	77	74	65	**60**	66	866
85-86	73	**80**	76	76	76	74	69	77	76	67	**59**	70	872
86-87	74	77	70	73	76	**80**	74	68	78	72	**64**	77	884
87-88	77	75	77	**81**	73	76	75	79	77	67	**67**	70	**894**
88-89	75	77	**79**	72	74	74	74	74	73	65	64	70	870
89-90	73	72	79	74	76	78	77	**83**	74	67	59	68	880
90-91	73	76	74	73	75	77	76	**77**	76	73	61	67	878
91-92	76	69	69	75	76	75	77	**79**	76	72	63	64	872
Moy	**75**	**74**	**74**	**74**	**75**	**75**	**75**	**76**	**74**	**67**	**62**	**69**	**869**
Max	**78**	**80**	**79**	**81**	**77**	**81**	**78**	**83**	**78**	**73**	**68**	**77**	**894**
Min	**72**	**60**	**69**	**69**	**72**	**71**	**69**	**68**	**62**	**59**	**59**	**64**	**850**

ETP (mm) de la Nyamagana

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	74	74	72	73	75	77	74	74	72	65	62	69	863
73-74	75	74	74	72	73	74	74	74	72	65	61	69	856
74-75	74	75	74	72	73	74	74	74	73	67	63	69	861
75-76	72	74	74	73	74	73	74	74	73	65	62	68	856
76-77	74	74	69	71	75	74	71	75	73	66	63	70	855
77-78	75	77	71	71	76	75	74	74	72	66	60	67	858
78-79	**71**	73	70	71	**72**	74	76	77	73	65	60	70	853
79-80	75	77	74	**68**	**72**	74	73	75	76	67	62	65	858
80-81	**78**	73	71	72	**72**	72	74	78	74	65	61	70	859
81-82	72	76	75	73	75	74	77	73	**61**	**58**	61	66	**841**
82-83	74	**59**	73	77	76	79	76	76	75	67	**67**	69	868
83-84	77	74	73	73	73	**70**	71	73	71	62	64	69	853
84-85	74	74	70	74	74	77	76	76	73	65	60	65	858
85-86	72	**79**	75	75	75	74	69	76	75	66	59	70	864
86-87	73	76	69	72	75	**79**	73	**68**	**77**	71	64	**76**	875
87-88	76	75	77	**81**	73	75	74	78	76	66	66	70	**886**
88-89	74	76	78	71	73	73	74	73	73	65	63	70	864
89-90	72	71	**79**	74	75	77	76	**82**	74	67	**58**	68	873
90-91	72	75	73	72	74	76	75	77	76	**72**	61	67	870
91-92	75	69	**69**	74	**76**	74	77	78	75	**72**	62	**64**	864
Moy	**74**	**74**	**73**	**73**	**74**	**75**	**74**	**75**	**73**	**66**	**62**	**69**	**862**
Max	**78**	**79**	**79**	**81**	**76**	**79**	**77**	**82**	**77**	**72**	**67**	**76**	**886**
min	**71**	**59**	**69**	**68**	**72**	**70**	**69**	**68**	**61**	**58**	**58**	**64**	**841**

ETP (mm) de la Muhira

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	74	74	71	73	75	78	74	73	71	66	63	70	862
73-74	75	74	74	72	**71**	73	74	73	71	66	60	69	853
74-75	74	76	74	70	72	74	73	73	72	67	64	69	858
75-76	**71**	74	74	73	74	71	74	74	72	66	63	69	853
76-77	73	75	**69**	71	74	73	71	74	72	66	64	70	853
77-78	75	77	70	71	76	75	74	73	72	66	61	67	857
78-79	73	74	70	71	72	72	**76**	76	73	66	61	71	854
79-80	76	77	74	**68**	**71**	74	72	75	74	67	62	66	856
80-81	**78**	73	71	71	72	72	74	77	73	65	62	70	858
81-82	72	76	75	73	74	73	76	72	**63**	**61**	62	68	**843**
82-83	75	**61**	72	76	**76**	**80**	76	75	75	68	59	**65**	859
83-84	77	74	74	73	73	**70**	72	73	72	63	65	70	856
84-85	75	75	70	74	74	76	76	75	72	65	60	66	858
85-86	72	**79**	75	75	75	74	**69**	75	74	66	**59**	71	865
86-87	73	76	69	72	74	79	74	**70**	**76**	**71**	65	**76**	876
87-88	76	75	76	**80**	72	75	74	77	75	67	**66**	69	**882**
88-89	75	76	**78**	71	73	73	74	74	72	65	64	70	866
89-90	72	71	**78**	73	75	77	76	**82**	74	67	60	68	873
Moy	**74**	**74**	**73**	**73**	**74**	**74**	**74**	**75**	**72**	**66**	**62**	**69**	**860**
Max	**78**	**79**	**78**	**80**	**76**	**80**	**76**	**82**	**76**	**71**	**66**	**76**	**882**
Min	**71**	**61**	**69**	**68**	**71**	**70**	**69**	**70**	**63**	**61**	**59**	**65**	**843**

ETP (mm) la Kaburantwa

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
73-74	**72**	71	69	67	**67**	70	70	68	66	60	**57**	66	805
74-75	69	71	69	67	68	69	68	67	67	63	60	65	802
75-76	**65**	68	69	68	70	**67**	70	69	67	62	61	65	802
76-77	69	72	67	68	69	70	68	69	67	62	62	66	807
77-78	71	**74**	66	68	72	71	69	68	66	62	59	66	810
78-79	70	70	65	67	68	68	72	69	67	61	60	69	807
79-80	**74**	74	69	**65**	68	70	68	70	68	63	60	**64**	812
80-81	74	71	67	67	69	69	69	70	66	62	60	66	810
81-82	68	72	70	68	70	69	72	**67**	**60**	**60**	60	66	**801**
82-83	70	**58**	67	71	**73**	**76**	**73**	70	70	66	**64**	66	825
83-84	72	70	71	68	68	68	69	69	68	61	61	67	812
84-85	72	71	**65**	70	70	70	72	69	67	62	59	65	813
85-86	68	74	70	70	71	71	**67**	69	69	61	58	70	817
86-87	69	71	66	68	70	74	71	69	**70**	66	64	**71**	829
87-88	73	72	70	**75**	68	72	70	72	69	63	62	65	**831**
88-89	71	72	72	66	68	69	70	68	67	61	60	67	810
89-90	68	67	**72**	68	70	72	71	**76**	69	65	59	67	824
90-91	69	71	69	68	70	73	72	71	69	**68**	58	66	824
91-92	73	65	66	69	71	70	73	72	69	66	60	64	818
Moy	**70**	**70**	**68**	**68**	**69**	**70**	**70**	**70**	**67**	**63**	**60**	**66**	**814**
Max	**74**	**74**	**72**	**75**	**73**	**76**	**73**	**76**	**70**	**68**	**64**	**71**	**831**
Min	**65**	**58**	**65**	**65**	**67**	**67**	**67**	**67**	**60**	**60**	**57**	**64**	**801**

ETP (mm) de la Kagunuzi

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	72	72	69	71	**73**	**76**	72	70	68	64	62	68	835
73-74	**73**	72	71	69	**69**	72	71	70	68	62	58	67	823
74-75	71	**73**	71	68	70	71	70	70	69	65	61	66	825
75-76	67	71	71	70	72	**69**	**72**	71	70	64	61	67	825
76-77	71	**73**	68	69	71	72	69	71	69	64	63	68	828
77-78	72	**75**	67	69	73	72	70	70	68	63	59	66	825
78-79	71	71	67	69	70	71	**74**	72	69	63	60	70	827
79-80	74	**75**	70	**66**	70	72	70	72	71	65	61	**64**	829
80-81	**75**	72	69	69	70	70	71	73	69	63	61	68	829
81-82	70	73	72	70	72	71	73	69	**60**	**60**	61	67	**816**
82-83	72	58	69	73	73	**77**	74	72	72	66	65	67	838
83-84	74	71	72	70	70	69	70	70	70	62	63	68	828
84-85	73	72	**67**	71	71	72	73	71	69	63	59	65	826
85-86	70	76	72	72	**73**	72	**68**	72	71	63	**58**	70	835
86-87	70	73	67	69	72	75	72	**68**	**73**	68	64	**73**	843
87-88	74	73	72	**77**	70	73	71	74	71	64	63	67	**848**
88-89	72	74	**74**	68	70	71	71	71	69	63	62	68	833
89-90	70	69	**74**	70	72	74	73	**78**	71	66	59	67	843
90-91	70	72	70	69	71	74	73	73	71	**69**	59	66	838
91-92	74	66	67	71	73	72	75	75	71	**69**	**61**	65	838
Moy	**72**	**71**	**70**	**70**	**71**	**72**	**72**	**72**	**69**	**64**	**61**	**67**	**832**
Max	**75**	**76**	**74**	**77**	**73**	**77**	**75**	**78**	**73**	**69**	**65**	**73**	**848**
Min	**67**	**58**	**67**	**66**	**69**	**69**	**68**	**68**	**60**	**60**	**58**	**64**	**816**

ETP(mm) de la Mpanda à Gatura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	70	71	69	68	72	75	71	72	69	63	59	67	825
73-74	73	69	70	68	**68**	70	71	71	69	64	59	65	**818**
74-75	69	72	71	68	70	70	71	72	70	62	61	67	822
75-76	69	71	71	70	71	69	72	**73**	70	62	61	67	826
76-77	71	70	66	68	72	72	71	72	71	64	63	69	827
77-78	73	77	69	71	74	72	72	71	68	62	59	**63**	829
78-79	69	73	68	70	71	73	72	**74**	69	63	58	69	830
79-80	73	**77**	71	**66**	71	72	69	73	73	64	59	64	833
80-81	**75**	71	68	69	70	70	71	73	69	63	61	67	827
81-82	**69**	73	**72**	70	72	71	**74**	72	**63**	**59**	59	65	819
82-83	73	**61**	69	**74**	**74**	**76**	73	73	72	66	63	67	840
83-84	74	71	70	70	70	**69**	69	71	69	60	61	67	821
84-85	72	72	67	69	70	73	73	72	69	63	59	66	825
85-86	71	**77**	72	70	72	70	**66**	73	71	63	**58**	68	831
86-87	70	72	**66**	67	71	75	73	**69**	**74**	**67**	**64**	**73**	**841**
Moy	**71**	**72**	**69**	**69**	**71**	**72**	**71**	**72**	**70**	**63**	**60**	**67**	**828**
Max	**75**	**77**	**72**	**74**	**74**	**76**	**74**	**74**	**74**	**67**	**64**	**73**	**841**
Min	**69**	**61**	**66**	**66**	**68**	**69**	**66**	**69**	**63**	**59**	**58**	**63**	**818**

ETP (mm) de la Mpanda à l'axe D

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	75	76	72	72	76	**80**	75	75	72	67	63	71	874
73-74	78	74	74	73	**72**	73	75	75	73	68	63	69	866
74-75	73	76	74	71	73	74	74	75	74	66	64	70	**865**
75-76	73	75	74	73	75	**72**	76	77	74	65	64	72	871
76-77	75	73	70	73	75	76	74	75	75	68	66	72	872
77-78	77	82	72	74	77	76	76	75	72	67	62	68	878
78-79	73	78	70	73	75	77	76	77	74	67	61	72	874
79-80	77	80	74	**70**	75	76	74	76	76	67	62	**67**	877
80-81	79	75	71	72	73	74	75	**78**	74	67	63	71	873
81-82	**73**	77	**76**	74	76	75	**78**	76	**68**	**63**	62	69	867
82-83	78	**65**	72	**78**	**77**	79	77	77	77	69	**67**	70	**886**
83-84	**79**	76	74	74	74	73	73	76	72	64	65	71	870
84-85	77	78	71	73	75	76	77	76	74	67	62	69	874
85-86	76	**83**	76	74	76	74	**71**	77	76	67	**60**	71	880
86-87	74	77	**69**	71	74	78	76	**74**	**78**	**72**	67	**76**	885
Moy	**76**	**76**	**73**	**73**	**75**	**76**	**75**	**76**	**74**	**67**	**64**	**71**	**874**
Max	**79**	**83**	**76**	**78**	**77**	**80**	**78**	**78**	**78**	**72**	**67**	**76**	**886**
Min	**73**	**65**	**69**	**70**	**72**	**72**	**71**	**74**	**68**	**63**	**60**	**67**	**865**

ETR (mm) de la Nyakagunda

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	49	75	72	74	75	78	75	75	73	67	49	16	777
73-74	75	75	74	73	73	74	74	75	73	67	61	69	863
74-75	75	76	74	72	73	75	74	75	74	68	52	10	797
75-76	73	75	74	74	75	73	74	75	74	66	59	66	856
76-77	56	75	69	72	76	75	72	76	73	66	52	60	822
77-78	76	78	71	72	77	76	75	74	73	67	41	12	793
78-79	72	74	71	72	73	74	76	78	74	66	60	41	832
79-80	**16**	77	74	**69**	**72**	74	73	75	76	67	56	**7**	**736**
80-81	**78**	73	71	72	**72**	73	75	79	74	65	50	46	830
81-82	73	77	76	74	76	74	**78**	74	**62**	59	61	23	806
82-83	73	**60**	74	78	**77**	**81**	77	77	76	68	68	70	879
83-84	78	75	74	74	74	**71**	72	74	72	**54**	**19**	66	803
84-85	39	75	71	74	74	78	77	77	74	65	60	22	786
85-86	73	**80**	76	76	76	74	**69**	77	76	67	57	9	808
86-87	48	77	70	73	76	80	74	**68**	**78**	72	64	42	822
87-88	77	75	77	**81**	73	76	75	79	77	67	66	**70**	**893**
88-89	75	77	**79**	72	74	74	74	74	73	65	64	**70**	870
89-90	73	72	79	74	76	78	77	**83**	74	67	59	31	844
90-91	73	76	74	73	75	77	76	77	76	**73**	61	64	874
91-92	60	69	**69**	75	76	75	77	79	76	72	63	38	829
Moy	**66**	**74**	**74**	**74**	**75**	**75**	**75**	**76**	**74**	**67**	**56**	**42**	**826**
Max	**78**	**80**	**79**	**81**	**77**	**81**	**78**	**83**	**78**	**73**	**68**	**70**	**893**
Min	**16**	**60**	**69**	**69**	**72**	**71**	**69**	**68**	**62**	**54**	**19**	**7**	**736**

ETR (mm) de la Nyamagana

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	57	74	72	73	75	77	74	74	72	65	52	19	785
73-74	75	74	74	72	73	74	74	74	72	65	61	69	856
74-75	74	75	74	72	73	74	74	74	73	67	63	13	805
75-76	72	74	74	73	74	73	74	74	73	65	62	66	854
76-77	52	74	69	71	75	74	71	75	73	66	50	59	808
77-78	75	77	71	71	76	75	74	74	72	66	43	11	786
78-79	71	73	70	71	**72**	74	76	77	73	65	60	48	831
79-80	**17**	77	74	**68**	**72**	74	73	75	76	67	59	**8**	**741**
80-81	**78**	73	71	72	**72**	72	74	78	74	65	51	50	828
81-82	72	76	75	73	75	74	**77**	73	**61**	58	61	31	806
82-83	74	**59**	73	77	76	**79**	76	76	75	67	**67**	69	868
83-84	77	74	73	73	73	**70**	71	73	71	**58**	**17**	69	801
84-85	74	74	70	74	74	77	76	76	73	65	60	28	820
85-86	72	**79**	75	75	75	74	**69**	76	75	66	59	12	806
86-87	50	76	69	72	75	79	73	**68**	**77**	71	64	49	825
87-88	76	75	77	**81**	73	75	74	78	76	66	66	**70**	**886**
88-89	74	76	78	71	73	73	74	73	73	65	63	**70**	864
89-90	72	71	**79**	74	75	77	76	**82**	74	67	58	47	852
90-91	72	75	73	72	74	76	75	77	76	**72**	61	67	870
91-92	66	69	**69**	74	**76**	74	**77**	78	75	**72**	62	38	829
Moy	**68**	**74**	**73**	**73**	**74**	**75**	**74**	**75**	**73**	**66**	**57**	**45**	**826**
Max	**78**	**79**	**79**	**81**	**76**	**79**	**77**	**82**	**77**	**72**	**67**	**70**	**886**
min	**17**	**59**	**69**	**68**	**72**	**70**	**69**	**68**	**61**	**58**	**17**	**8**	**741**

ETR (mm) de la Muhira

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	54	74	71	73	75	78	74	73	71	66	50	10	769
73-74	75	74	74	72	71	73	74	73	71	66	60	69	853
74-75	74	76	74	70	72	74	73	73	72	67	61	**6**	793
75-76	71	74	74	73	74	71	74	74	72	66	58	69	848
76-77	73	75	69	71	74	73	71	74	72	66	44	69	832
77-78	75	77	70	71	**76**	75	74	73	72	66	39	10	778
78-79	73	74	70	71	72	72	**76**	76	73	66	61	22	804
79-80	**14**	77	74	**68**	**71**	74	72	75	74	67	62	40	768
80-81	**78**	73	71	71	72	72	74	77	73	65	46	67	839
81-82	72	76	75	73	74	73	**76**	72	**63**	61	62	16	791
82-83	75	**61**	72	76	76	**80**	**76**	75	75	68	**67**	**70**	**872**
83-84	69	74	74	73	73	**70**	72	73	72	**59**	**10**	58	778
84-85	33	75	70	74	74	76	76	75	72	65	60	15	**765**
85-86	72	**79**	75	75	75	74	**69**	75	74	66	59	7	801
86-87	73	76	**69**	72	74	79	74	**70**	**76**	**71**	64	34	833
87-88	76	75	76	**80**	72	75	74	77	75	67	55	69	871
88-89	75	76	**78**	71	73	73	74	74	72	65	64	70	866
89-90	72	71	**78**	73	75	77	76	**82**	74	67	53	26	824
Moy	**67**	**74**	**73**	**73**	**74**	**74**	**74**	**75**	**72**	**66**	**54**	**40**	**816**
Max	**78**	**79**	**78**	**80**	**76**	**80**	**76**	**82**	**76**	**71**	**67**	**70**	**872**
Min	**14**	**61**	**69**	**68**	**71**	**70**	**69**	**70**	**63**	**59**	**10**	**6**	**765**

ETR (mm) de la Kaburantwa

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
73-74	**72**	71	69	67	**67**	70	70	68	66	60	57	66	805
74-75	69	71	69	67	68	69	68	67	67	63	60	25	762
75-76	65	68	69	68	70	**67**	70	69	67	62	**61**	65	802
76-77	69	72	67	68	69	70	68	69	67	62	47	66	793
77-78	71	**74**	66	68	72	71	69	68	66	62	41	**4**	**731**
78-79	70	70	**65**	67	68	68	72	69	67	61	60	22	759
79-80	**15**	**74**	69	**65**	68	70	68	70	68	63	60	64	754
80-81	**74**	71	67	67	69	69	69	70	66	62	52	66	802
81-82	68	72	70	68	70	69	72	**67**	**60**	**60**	60	15	750
82-83	70	**58**	67	71	**73**	**76**	**73**	70	**70**	66	57	53	804
83-84	72	70	71	68	68	68	69	69	68	61	**21**	63	767
84-85	72	71	65	70	70	70	72	69	67	62	59	18	766
85-86	68	74	70	70	71	71	**67**	69	69	61	58	21	767
86-87	69	71	66	68	70	74	71	69	**70**	66	60	33	787
87-88	73	72	70	**75**	68	72	70	72	69	63	45	65	813
88-89	71	72	**72**	66	68	69	70	68	67	61	60	**67**	810
89-90	68	67	**72**	68	70	72	71	**76**	69	65	50	30	777
90-91	69	71	69	68	70	73	72	71	69	**68**	58	56	**813**
91-92	73	65	66	69	71	70	73	72	69	66	60	30	783
Moy	**67**	**70**	**68**	**68**	**69**	**70**	**70**	**70**	**67**	**63**	**54**	**44**	**781**
Max	**74**	**74**	**72**	**75**	**73**	**76**	**73**	**76**	**70**	**68**	**61**	**67**	**813**
Min	**15**	**58**	**65**	**65**	**67**	**67**	**67**	**67**	**60**	**60**	**21**	**4**	**731**

ETR (mm) de la Kagunuzi

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	72	72	69	71	**73**	76	72	70	68	64	58	6	770
73-74	73	72	71	69	**69**	72	71	70	68	62	58	67	823
74-75	71	73	71	68	70	71	70	70	69	65	52	5	**753**
75-76	67	71	71	70	72	69	72	71	70	64	61	67	825
76-77	71	73	68	69	71	72	69	71	69	64	58	68	823
77-78	72	75	67	69	73	72	70	70	68	63	59	61	820
78-79	71	71	67	69	70	71	74	72	69	63	60	16	773
79-80	74	75	70	**66**	70	72	70	72	71	65	61	51	815
80-81	**75**	72	69	69	70	70	71	73	69	63	51	68	819
81-82	70	73	72	70	72	71	73	69	**60**	**60**	61	26	775
82-83	72	**58**	69	73	73	**77**	74	72	72	66	**46**	39	790
83-84	69	71	72	70	70	**69**	70	70	70	62	28	56	776
84-85	**53**	72	67	71	71	72	73	71	69	63	59	19	761
85-86	70	**76**	72	72	73	72	**68**	72	71	63	58	11	776
86-87	70	73	**67**	69	72	75	72	**68**	**73**	68	43	22	771
87-88	74	73	72	**77**	70	73	71	74	71	64	44	56	818
88-89	72	74	**74**	68	70	71	71	71	69	63	**62**	**68**	**833**
89-90	70	69	**74**	70	72	74	73	**78**	71	66	35	18	770
90-91	70	72	70	69	71	74	73	73	71	**69**	59	17	789
91-92	70	66	67	71	73	72	**75**	75	71	**69**	61	**0**	769
Moy	**70**	**71**	**70**	**70**	**71**	**72**	**72**	**72**	**69**	**64**	**54**	**37**	**793**
Max	**75**	**76**	**74**	**77**	**73**	**77**	**75**	**78**	**73**	**69**	**62**	**68**	**833**
Min	**53**	**58**	**67**	**66**	**69**	**69**	**68**	**68**	**60**	**60**	**28**	**0**	**753**

ETR (mm) de la Mpanda à Gatura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	70	71	69	68	72	75	71	72	69	63	59	6	764
73-74	73	69	70	68	**68**	70	71	71	69	64	59	65	818
74-75	69	72	71	68	70	70	71	72	70	62	50	5	749
75-76	69	71	71	70	71	**69**	72	73	70	62	60	67	825
76-77	71	70	**66**	68	72	72	71	72	71	64	**61**	**69**	825
77-78	70	77	69	71	**74**	72	72	71	68	62	59	63	**826**
78-79	69	73	68	70	71	73	72	**74**	69	63	58	20	781
79-80	**8**	77	71	**66**	71	72	69	73	73	64	59	2	**705**
80-81	**75**	71	68	69	70	70	71	73	69	63	55	65	819
81-82	69	73	72	70	72	71	**74**	72	**63**	**59**	59	22	776
82-83	73	**61**	69	**74**	**74**	**76**	73	73	72	66	45	54	810
83-84	59	71	70	70	70	69	69	71	69	60	41	48	767
84-85	62	72	67	69	70	73	73	72	69	63	59	14	763
85-86	71	**77**	**72**	70	72	70	**66**	73	71	63	54	**2**	761
86-87	70	72	66	67	71	75	73	**69**	**74**	**67**	**40**	11	755
Moy	**65**	**72**	**69**	**69**	**71**	**72**	**71**	**72**	**70**	**63**	**54**	**34**	**783**
Max	**75**	**77**	**72**	**74**	**74**	**76**	**74**	**74**	**74**	**67**	**61**	**69**	**826**
Min	**8**	**61**	**66**	**66**	**68**	**69**	**66**	**69**	**63**	**59**	**40**	**2**	**705**

ETR (mm) de la Mpanda à l'axe D

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	75	76	72	72	76	**80**	75	75	72	67	55	4	800
73-74	**78**	74	74	73	**72**	73	75	75	73	68	**63**	69	**866**
74-75	73	76	74	71	73	74	74	75	**74**	66	31	3	766
75-76	73	75	74	73	75	**72**	76	77	**74**	65	52	59	845
76-77	75	73	70	73	75	76	74	75	75	68	51	**70**	854
77-78	47	**57**	72	74	**77**	76	76	75	72	67	62	41	797
78-79	73	78	70	73	75	77	76	77	**74**	67	61	9	811
79-80	77	80	74	**70**	75	76	74	76	76	67	50	3	801
80-81	**79**	75	71	72	73	74	75	**78**	**74**	67	47	67	853
81-82	73	77	**76**	74	76	75	**78**	76	**68**	**63**	62	8	807
82-83	59	65	72	**78**	77	79	77	77	77	69	37	39	806
83-84	45	76	74	74	74	73	73	76	72	64	**18**	33	**751**
84-85	**43**	78	71	73	75	76	77	76	74	67	44	**0**	753
85-86	76	**83**	76	74	76	74	**71**	77	76	67	49	2	800
86-87	56	77	**69**	71	74	78	76	**74**	78	**72**	35	7	767
Moy	**67**	**75**	**73**	**73**	**75**	**76**	**75**	**76**	**74**	**67**	**48**	**28**	**805**
Max	**79**	**83**	**76**	**78**	**77**	**80**	**78**	**78**	**78**	**72**	**63**	**70**	**866**
Min	**43**	**57**	**69**	**70**	**72**	**72**	**71**	**74**	**68**	**63**	**18**	**0**	**751**

Annexe V.2 : Stock mensuel d'humidité du sol (en mm) des bassins

Bassin de la Nyakagunda

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	0	34	100	100	100	100	100	100	100	46	0	0
73-74	89	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	49
74-75	14	59	100	96	100	100	100	100	86	41	0	0
75-76	67	100	97	100	100	100	100	100	100	54	0	0
76-77	0	26	100	100	100	100	100	100	100	52	0	0
77-78	14	3	100	100	100	100	100	100	100	41	0	0
78-79	59	100	100	100	100	100	100	100	100	85	25	0
79-80	0	23	100	100	100	100	100	100	100	54	0	0
80-81	11	100	100	100	100	100	100	100	100	47	0	0
81-82	1	50	100	100	100	100	100	100	100	72	12	0
82-83	0	100	100	100	100	100	100	100	99	72	5	20
83-84	21	100	100	100	100	100	100	100	54	0	0	0
84-85	0	37	100	100	100	100	100	100	100	79	21	0
85-86	63	74	100	100	100	100	100	100	100	57	0	0
86-87	0	100	100	100	100	100	100	100	100	60	5	0
87-88	100	100	100	100	100	100	100	100	89	23	0	49
88-89	82	100	100	100	100	100	100	100	100	57	47	37
89-90	15	100	100	100	100	100	100	100	100	63	5	0
90-91	26	44	100	100	100	100	100	100	100	100	54	0
91-92	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	38	0
Moy	**28**	**72**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**96**	**60**	**16**	**8**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**49**
Min	**0**	**3**	**97**	**96**	**100**	**100**	**100**	**100**	**54**	**0**	**0**	**0**

Bassin de la Nyamagana

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	0	33	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0
73-74	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	52
74-75	15	76	100	100	100	100	100	100	95	51	1	0
75-76	82	100	100	100	100	100	100	100	100	57	0	0
76-77	0	39	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0
77-78	21	13	100	100	100	100	100	100	100	43	0	0
78-79	79	100	100	100	100	100	100	100	100	89	29	0
79-80	0	27	100	100	100	100	100	100	100	57	0	0
80-81	20	100	100	100	100	100	100	100	100	48	0	0
81-82	1	61	100	100	100	100	100	100	100	78	18	0
82-83	2	100	100	100	100	100	100	100	100	75	9	36
83-84	40	100	100	100	100	100	100	100	58	0	0	1
84-85	0	43	100	100	100	100	100	100	100	83	26	0
85-86	76	100	100	100	100	100	100	100	100	61	2	0
86-87	0	100	100	100	100	100	100	100	100	60	7	0
87-88	100	100	100	100	100	100	100	100	93	29	0	68
88-89	100	100	100	100	100	100	100	100	100	61	58	58
89-90	44	100	100	100	100	100	100	100	100	69	11	0
90-91	33	56	100	100	100	100	100	100	100	100	56	0
91-92	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	38	0
Moy	**36**	**77**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**97**	**63**	**18**	**11**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**68**
Min	**0**	**13**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**58**	**0**	**0**	**0**

Bassin de la Muhira

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	0	44	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0
73-74	87	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	45
74-75	23	69	100	100	100	100	100	100	91	45	0	0
75-76	98	100	100	100	100	100	100	100	100	55	0	1
76-77	0	44	100	100	100	100	100	100	100	44	0	0
77-78	0	0	100	100	100	100	100	100	100	39	0	0
78-79	50	100	100	100	100	100	100	100	100	73	12	0
79-80	0	33	100	100	100	100	100	100	100	65	4	0
80-81	10	91	100	100	100	100	100	100	100	44	0	0
81-82	13	74	100	100	100	100	100	100	100	63	2	0
82-83	10	100	100	100	100	100	100	100	99	58	0	0
83-84	0	100	100	100	100	100	100	100	59	0	0	0
84-85	0	47	100	100	100	100	100	100	100	73	15	0
85-86	63	99	100	100	100	100	100	100	100	61	2	0
86-87	2	100	100	100	100	100	100	100	100	56	0	0
87-88	100	100	100	100	100	100	100	100	91	25	0	41
88-89	60	100	100	100	100	100	100	100	100	67	51	29
89-90	16	100	100	100	100	100	100	100	100	53	0	0
Moy	**29**	**78**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**97**	**54**	**10**	**6**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**45**
Min	**0**	**0**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**59**	**0**	**0**	**0**

Bassin de la Kaburantwa

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
73-74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	48
74-75	43	100	100	100	100	100	100	100	100	66	21	0
75-76	100	100	100	100	100	100	100	100	100	65	6	25
76-77	56	100	100	100	100	100	100	100	100	47	0	12
77-78	27	50	100	100	100	100	100	100	100	41	0	0
78-79	58	100	100	100	100	100	100	100	100	74	15	0
79-80	0	53	100	100	100	100	100	100	100	78	18	21
80-81	31	100	100	100	100	100	100	100	100	50	0	28
81-82	84	100	100	100	100	100	100	100	100	67	7	0
82-83	52	100	100	100	100	100	100	100	100	57	0	0
83-84	11	100	100	100	100	100	100	100	73	12	0	0
84-85	0	88	100	100	100	100	100	100	100	76	17	0
85-86	84	100	100	100	100	100	100	100	100	75	17	0
86-87	37	100	100	100	100	100	100	100	100	52	0	0
87-88	100	100	100	100	100	100	100	100	100	37	0	57
88-89	79	100	100	100	100	100	100	100	100	79	70	49
89-90	53	100	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0
90-91	82	100	100	100	100	100	100	100	100	100	49	0
91-92	0	100	100	100	100	100	100	100	100	89	30	0
Moy	**52**	**94**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**99**	**64**	**18**	**13**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**57**
Min	**0**	**50**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**73**	**12**	**0**	**0**

Bassin de la Kagunuzi

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	41	100	100	100	100	100	100	100	100	58	0	0
73-74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	78	33
74-75	100	100	100	100	100	100	100	100	87	39	0	0
75-76	54	100	100	100	100	100	100	100	100	57	3	27
76-77	74	100	100	100	100	100	100	100	100	53	0	45
77-78	28	45	100	100	100	100	100	100	100	85	33	0
78-79	23	100	100	100	100	100	100	100	100	71	12	0
79-80	0	38	100	100	100	100	100	100	100	80	21	0
80-81	36	100	100	100	100	100	100	100	100	49	0	23
81-82	68	100	100	100	100	100	100	100	100	81	21	0
82-83	37	100	100	100	84	100	100	100	100	44	0	0
83-84	0	100	100	100	100	100	100	100	71	10	0	0
84-85	0	100	100	100	100	100	100	100	100	78	19	0
85-86	59	85	100	100	100	100	100	100	100	68	10	0
86-87	39	100	100	100	100	100	100	100	100	41	0	0
87-88	80	100	100	100	100	100	100	100	100	36	0	0
88-89	16	100	100	100	100	100	100	100	100	85	71	60
89-90	50	100	100	100	100	100	100	100	100	35	0	0
90-91	61	100	100	100	100	100	100	100	100	73	15	0
91-92	0	100	100	100	100	100	100	100	100	61	0	0
Moy	**43**	**93**	**100**	**100**	**99**	**100**	**100**	**100**	**98**	**60**	**14**	**9**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**78**	**60**
Min	**0**	**38**	**100**	**100**	**84**	**100**	**100**	**100**	**71**	**10**	**0**	**0**

Bassin de la Mpanda à Gatura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	66	100	100	100	100	100	100	100	100	59	0	0
73-74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	31
74-75	100	100	100	100	100	100	100	100	88	33	0	0
75-76	21	100	98	100	100	100	100	100	100	56	0	8
76-77	78	100	100	100	100	100	100	100	100	59	0	21
77-78	0	1	100	100	100	100	100	100	100	100	49	33
78-79	77	100	100	100	100	100	100	100	100	75	17	0
79-80	0	19	100	100	100	100	100	100	100	56	0	0
80-81	53	100	100	100	100	100	100	100	100	51	0	0
81-82	37	100	100	100	100	100	100	100	100	78	20	0
82-83	9	100	100	100	92	100	100	100	100	42	0	0
83-84	0	100	100	100	100	100	100	100	80	19	0	0
84-85	0	100	100	100	100	100	100	100	100	72	13	0
85-86	41	84	100	100	100	100	100	100	100	54	0	0
86-87	0	100	100	100	100	100	100	100	100	40	0	0
Moy	**39**	**87**	**100**	**100**	**99**	**100**	**100**	**100**	**98**	**60**	**11**	**6**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**70**	**33**
Min	**0**	**1**	**98**	**100**	**92**	**100**	**100**	**100**	**80**	**19**	**0**	**0**

Bassin de la Mpanda à l'axe D

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
72-73	39	100	100	100	100	100	100	100	100	55	0	0
73-74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	85	50	0
74-75	100	100	100	100	100	100	100	100	69	10	0	0
75-76	9	57	47	100	100	100	100	100	100	49	0	0
76-77	35	100	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0
77-78	0	0	100	100	100	100	100	100	82	65	8	0
78-79	8	71	100	100	100	100	100	100	100	63	1	0
79-80	0	0	100	100	100	100	100	100	100	49	0	0
80-81	21	100	100	100	100	100	100	100	100	42	0	0
81-82	8	55	94	100	100	100	100	100	100	68	6	0
82-83	0	100	100	100	100	100	100	100	100	35	0	0
83-84	0	68	100	100	100	100	100	100	66	1	0	0
84-85	0	58	100	100	100	100	100	100	87	44	0	0
85-86	9	16	100	100	100	100	100	100	100	49	0	0
86-87	0	92	100	100	100	100	100	100	100	35	0	0
Moy	**22**	**68**	**96**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**94**	**47**	**4**	**0**
Max	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**85**	**50**	**0**
Min	**0**	**0**	**47**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**66**	**1**	**0**	**0**

Annexe V.3 : Disponibilité de l'eau utile (en mm) dans les bassins

Bassin de la Nyakagunda

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	0	100	233	93	94	61	84	133	0	0	0	797
73-74	0	71	118	111	128	82	121	188	127	34	16	0	998
74-75	0	0	83	0	92	4	142	117	0	0	0	0	438
75-76	0	27	0	106	22	57	68	72	14	0	0	0	365
76-77	0	0	49	16	91	73	112	159	37	0	0	0	537
77-78	0	0	56	108	35	91	168	117	69	0	0	0	644
78-79	0	10	119	86	28	113	38	135	130	0	0	0	658
79-80	0	0	87	82	135	160	193	91	192	0	0	0	942
80-81	0	4	152	130	82	65	94	103	110	0	0	0	740
81-82	0	0	20	95	115	66	145	164	140	0	0	0	745
82-83	0	36	261	76	93	7	171	155	0	0	0	0	799
83-84	0	112	115	58	140	87	185	72	0	0	0	0	769
84-85	0	0	102	93	95	31	91	304	62	0	0	0	777
85-86	0	0	126	146	126	80	66	178	52	0	0	0	774
86-87	0	0	139	103	200	76	203	202	142	0	0	0	1,066
87-88	25	78	211	34	200	250	214	200	0	0	0	0	1,213
88-89	0	22	176	115	69	48	195	138	86	0	0	0	849
89-90	0	67	164	135	83	168	223	192	92	0	0	0	1,124
90-91	0	0	67	159	145	81	125	120	202	32	0	0	931
91-92	0	118	52	96	65	29	153	214	60	14	0	0	801
Moy	1	27	110	99	102	83	138	150	82	4	1	0	798
Max	25	118	261	233	200	250	223	304	202	34	16	0	1,213
Min	0	0	0	0	22	4	38	72	0	0	0	0	365

Bassin de la Nyamagana

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	0	110	270	109	107	74	95	138	0	0	0	904
73-74	0	87	133	125	144	98	138	217	147	44	27	0	1159
74-75	0	0	114	0	110	13	140	139	0	0	0	0	516
75-76	0	62	2	128	36	66	70	90	17	0	0	0	470
76-77	0	0	89	23	104	73	126	167	46	0	0	0	628
77-78	0	0	69	123	39	105	185	134	75	0	0	0	730
78-79	0	35	130	89	32	130	35	149	146	0	0	0	746
79-80	0	0	114	104	152	191	215	113	210	0	0	0	1098
80-81	0	29	160	143	86	68	109	116	126	0	0	0	837
81-82	0	0	51	102	125	80	174	178	166	0	0	0	877
82-83	0	55	300	84	118	14	185	169	10	0	0	0	934
83-84	0	164	140	66	162	101	217	82	0	0	0	0	931
84-85	0	0	128	109	115	42	102	325	74	0	0	0	894
85-86	0	0	182	174	143	93	77	191	68	0	0	0	928
86-87	0	5	162	119	219	90	217	233	155	0	0	0	1201
87-88	54	93	241	49	228	289	243	230	0	0	0	0	1427
88-89	14	59	210	126	70	56	220	150	79	0	0	0	985
89-90	0	124	186	161	79	201	244	225	116	0	0	0	1335
90-91	0	0	104	164	176	95	138	125	228	48	0	0	1078
91-92	0	139	64	118	83	37	175	240	63	29	0	0	947
Moy	3	42	135	114	116	98	154	168	93	6	1	0	931
Max	54	164	300	270	228	289	244	325	228	48	27	0	1427
Min	0	0	2	0	32	13	35	82	0	0	0	0	470

Bassin de la Muhira

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	0	113	217	143	92	59	121	168	0	0	0	913
73-74	0	48	173	146	101	64	138	213	136	25	16	0	1061
74-75	0	0	99	29	108	38	122	166	0	0	0	0	562
75-76	0	29	14	93	65	50	78	133	34	0	0	0	497
76-77	0	0	133	76	109	43	134	153	85	0	0	0	734
77-78	0	0	57	122	43	112	250	117	55	0	0	0	755
78-79	0	49	140	85	60	143	59	167	154	0	0	0	858
79-80	0	0	93	115	139	136	184	135	135	0	0	0	938
80-81	0	0	128	182	89	60	119	117	136	0	0	0	831
81-82	0	0	41	115	114	58	112	198	133	0	0	0	772
82-83	0	29	248	97	60	7	159	183	0	0	0	0	783
83-84	0	74	110	123	142	81	161	87	0	0	0	0	779
84-85	0	0	114	95	103	61	125	273	47	0	0	0	818
85-86	0	0	154	125	128	103	61	222	68	0	0	0	862
86-87	0	16	147	102	192	87	157	194	162	0	0	0	1057
87-88	4	81	184	44	191	229	204	224	0	0	0	0	1159
88-89	0	47	147	124	121	75	194	136	65	0	0	0	910
89-90	0	49	108	132	25	157	182	191	55	0	0	0	898
Moy	0	23	122	112	107	89	139	168	80	1	1	0	844
Max	4	81	248	217	192	229	250	273	168	25	16	0	1159
Min	0	0	14	29	25	7	59	87	0	0	0	0	497

Bassin de la Kaburantwa

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	
73-74	4	72	203	187	105	80	148	253	186	26	28	0	1292
74-75	0	11	136	73	106	47	163	232	5	0	0	0	774
75-76	54	23	52	100	124	49	101	194	58	0	0	0	756
76-77	0	29	244	141	109	48	163	205	108	0	0	0	1047
77-78	0	0	156	148	52	153	309	180	71	0	0	0	1069
78-79	0	112	191	125	104	183	81	196	183	0	0	0	1174
79-80	0	0	161	157	152	107	193	180	133	0	0	0	1083
80-81	0	41	166	208	147	69	156	128	193	0	0	0	1108
81-82	0	72	72	157	139	51	125	274	128	0	0	0	1020
82-83	0	72	288	139	44	23	151	223	19	0	0	0	960
83-84	0	83	135	230	141	90	146	132	0	0	0	0	957
84-85	0	0	155	99	119	105	182	261	51	0	0	0	972
85-86	0	28	160	115	159	127	51	260	87	0	0	0	988
86-87	0	66	179	116	199	108	113	215	197	0	0	0	1194
87-88	15	102	187	71	208	239	219	287	0	0	0	0	1326
88-89	0	90	143	158	133	91	218	145	74	0	0	0	1051
89-90	0	107	81	144	15	179	179	211	47	0	0	0	963
90-91	0	50	141	159	135	101	113	218	212	1	0	0	1130
91-92	0	91	55	98	79	86	169	194	80	0	0	0	852
Moy	4	55	153	138	120	102	157	210	96	1	1	0	1038
Max	54	112	288	230	208	239	309	287	212	26	28	0	1326
Min	0	0	52	71	15	23	51	128	0	0	0	0	756

Bassin de la Kagunuzi

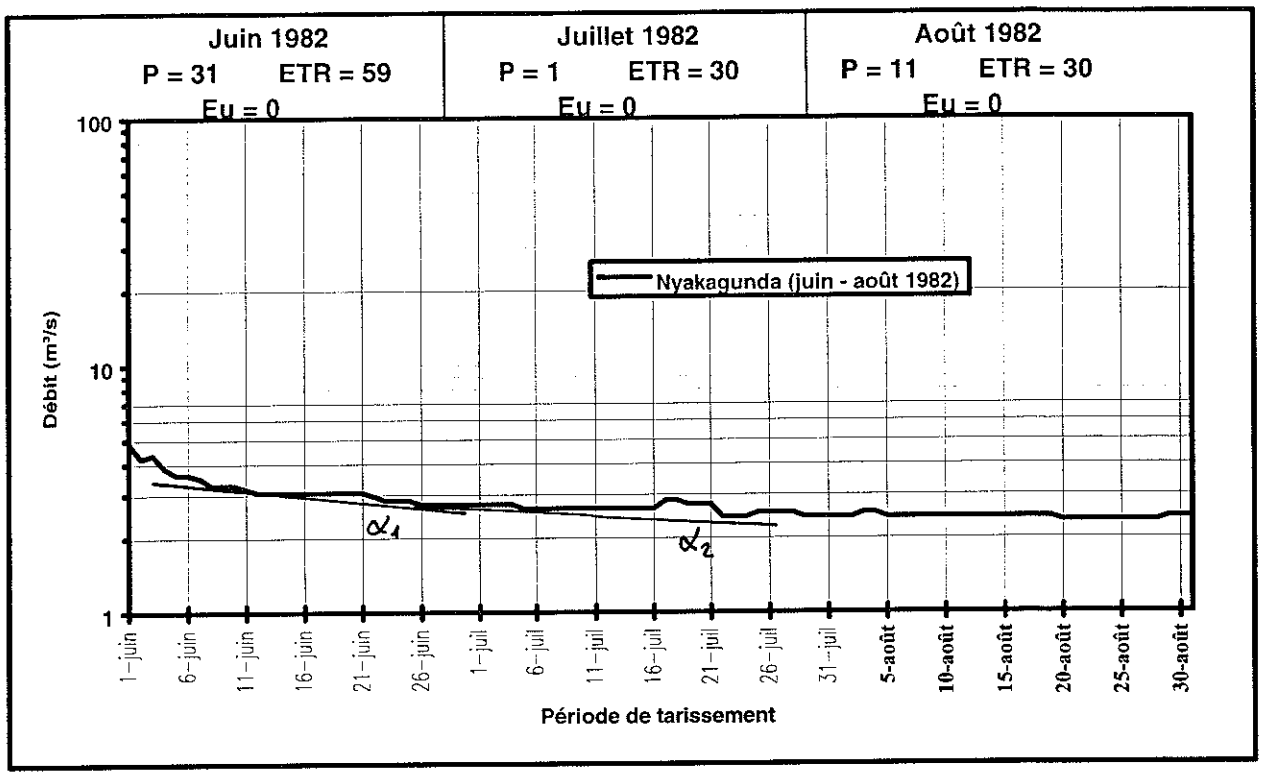
Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	78	198	159	**186**	55	**31**	198	157	0	0	0	1061
73-74	50	88	227	**219**	37	81	210	243	189	7	0	0	**1350**
74-75	99	34	143	90	121	41	115	163	**0**	0	0	0	808
75-76	0	4	**2**	102	103	54	141	146	116	0	0	0	**667**
76-77	0	60	136	113	122	113	141	165	52	0	0	0	902
77-78	0	0	155	175	93	**184**	**309**	172	26	0	0	0	1113
78-79	0	86	154	147	104	122	63	165	129	0	0	0	970
79-80	0	**0**	89	146	110	57	129	142	163	0	0	0	836
80-81	0	54	147	143	126	**23**	163	120	171	0	0	0	947
81-82	0	47	47	104	122	31	85	**288**	130	0	0	0	854
82-83	0	**100**	**291**	200	**0**	52	168	207	28	0	0	0	1045
83-84	0	24	107	152	115	68	104	152	0	0	0	0	720
84-85	0	17	136	**42**	126	159	197	250	16	0	0	0	941
85-86	0	0	146	60	119	135	66	243	116	0	0	0	884
86-87	0	98	150	75	163	111	88	208	129	0	0	0	1022
87-88	0	57	240	47	183	157	238	240	17	0	0	0	1177
88-89	0	16	98	129	172	89	155	**108**	67	0	0	0	834
89-90	0	39	39	127	43	121	138	191	25	**0**	**0**	**0**	722
90-91	0	58	103	89	96	70	61	234	**195**	0	0	0	906
91-92	0	26	37	89	60	104	119	173	67	**0**	**0**	**0**	676
Moy	**7**	**44**	**132**	**120**	**110**	**91**	**136**	**190**	**90**	**0**	**0**	**0**	**922**
Max	**99**	**100**	**291**	**219**	**186**	**184**	**309**	**288**	**195**	**7**	**0**	**0**	**1350**
Min	**0**	**0**	**2**	**42**	**0**	**23**	**31**	**108**	**0**	**0**	**0**	**0**	**667**

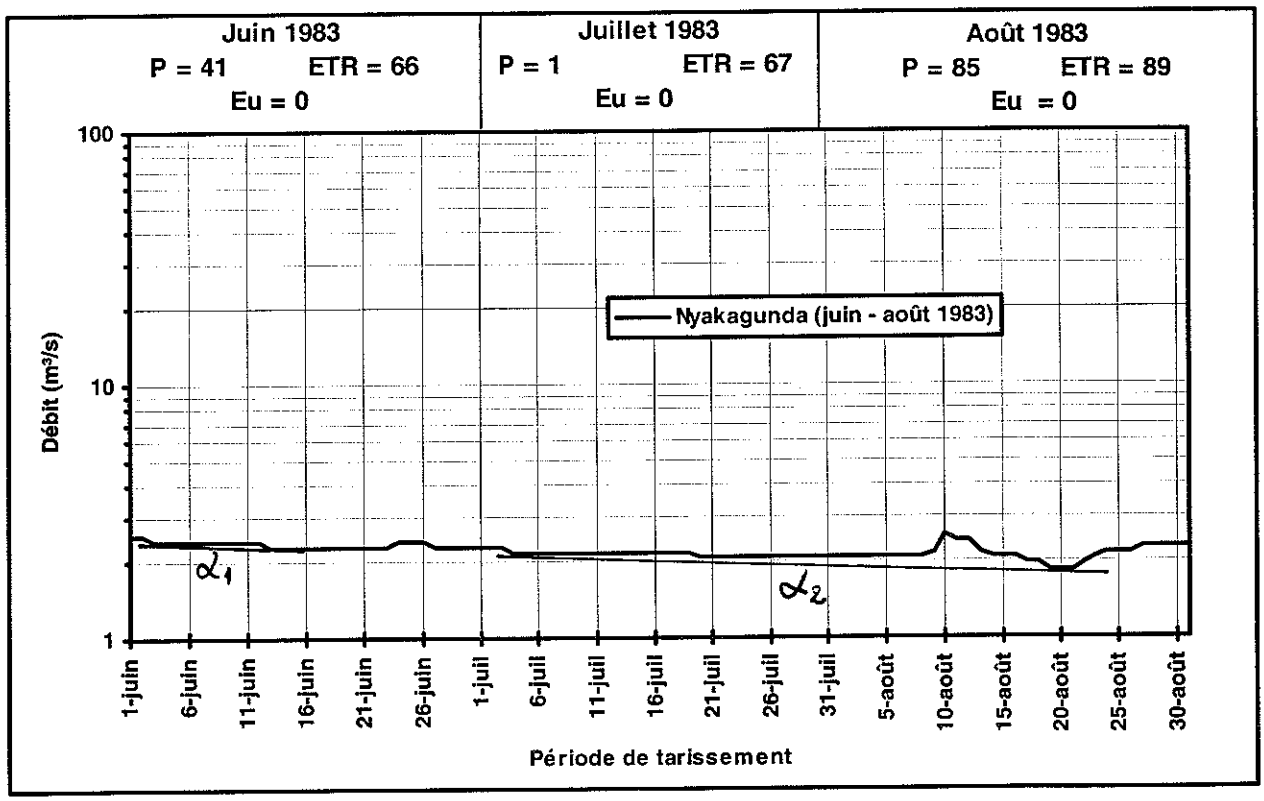
Bassin de la Mpanda à Gatura

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	129	177	155	146	39	**6**	136	113	0	**0**	**0**	902
73-74	70	104	244	174	41	87	195	252	187	**7**	**0**	**0**	**1362**
74-75	**140**	35	132	103	127	72	82	**103**	**0**	**0**	**0**	**0**	794
75-76	0	14	**0**	98	63	81	126	111	101	**0**	**0**	**0**	**594**
76-77	0	73	92	80	138	134	114	152	27	**0**	**0**	**0**	810
77-78	0	0	114	146	97	**191**	**282**	197	1	5	**0**	**0**	1033
78-79	0	99	123	147	68	120	52	199	70	**0**	**0**	**0**	877
79-80	0	0	85	150	101	80	107	127	**186**	**0**	**0**	**0**	835
80-81	0	102	139	127	98	**27**	177	117	148	**0**	**0**	**0**	935
81-82	0	12	52	83	110	41	113	246	119	**0**	**0**	**0**	775
82-83	0	81	**298**	173	**0**	89	184	169	24	**0**	**0**	**0**	1018
83-84	0	21	115	75	116	72	96	125	0	**0**	**0**	**0**	621
84-85	0	4	143	69	125	140	208	**264**	2	**0**	**0**	**0**	956
85-86	0	0	170	82	115	89	83	209	134	**0**	**0**	**0**	883
86-87	0	43	148	78	**170**	137	96	220	93	**0**	**0**	**0**	985
Moy	**14**	**48**	**135**	**116**	**101**	**93**	**128**	**175**	**80**	**1**	**0**	**0**	**892**
Max	**140**	**129**	**298**	**174**	**170**	**191**	**282**	**264**	**187**	**7**	**0**	**0**	**1362**
Min	**0**	**0**	**0**	**69**	**0**	**27**	**6**	**103**	**0**	**0**	**0**	**0**	**594**

Année	Bassin de la Mpanda à l'axe D												
	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
72-73	0	42	144	108	120	16	1	91	83	0	0	0	605
73-74	0	58	163	103	35	49	123	174	115	0	0	0	819
74-75	17	3	93	70	113	45	75	66	0	0	0	0	483
75-76	0	0	0	35	45	57	74	83	54	0	0	0	347
76-77	0	5	50	44	98	87	90	125	6	0	0	0	505
77-78	0	0	58	96	53	114	224	139	0	0	0	0	683
78-79	0	0	42	99	44	97	40	172	49	0	0	0	542
79-80	0	0	40	100	73	42	60	80	129	0	0	0	523
80-81	0	3	105	131	58	22	119	81	82	0	0	0	600
81-82	0	0	0	53	69	23	63	170	89	0	0	0	466
82-83	0	22	212	132	1	55	143	145	0	0	0	0	710
83-84	0	0	48	46	86	43	69	90	0	0	0	0	382
84-85	0	0	68	54	84	103	147	187	0	0	0	0	643
85-86	0	0	61	64	93	70	71	178	65	0	0	0	603
86-87	0	0	98	49	131	84	66	143	75	0	0	0	648
Moy	1	9	79	79	73	61	91	128	50	0	0	0	571
Max	17	58	212	132	131	114	224	187	129	0	0	0	819
Min	0	0	0	35	1	16	1	66	0	0	0	0	347

Annexe VI.1 : Courbes de tarissement de la Nyakagunda (1982-1986)



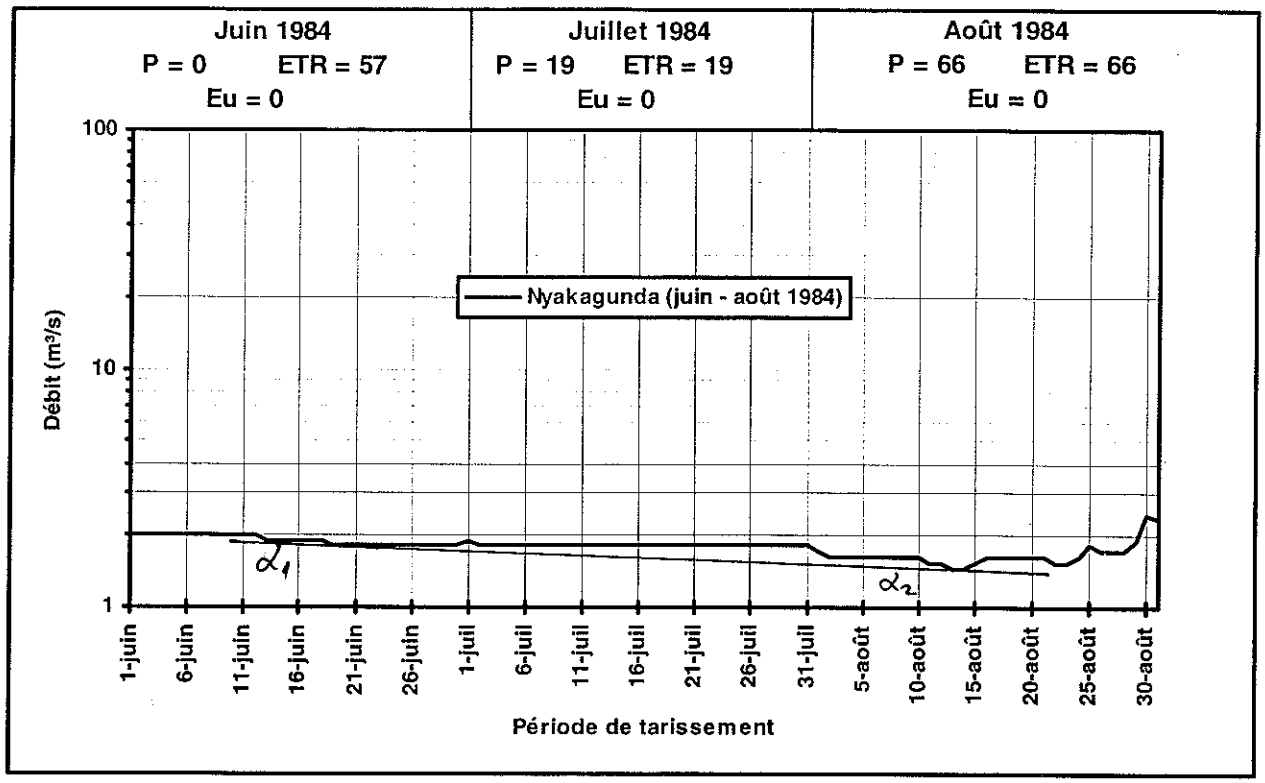


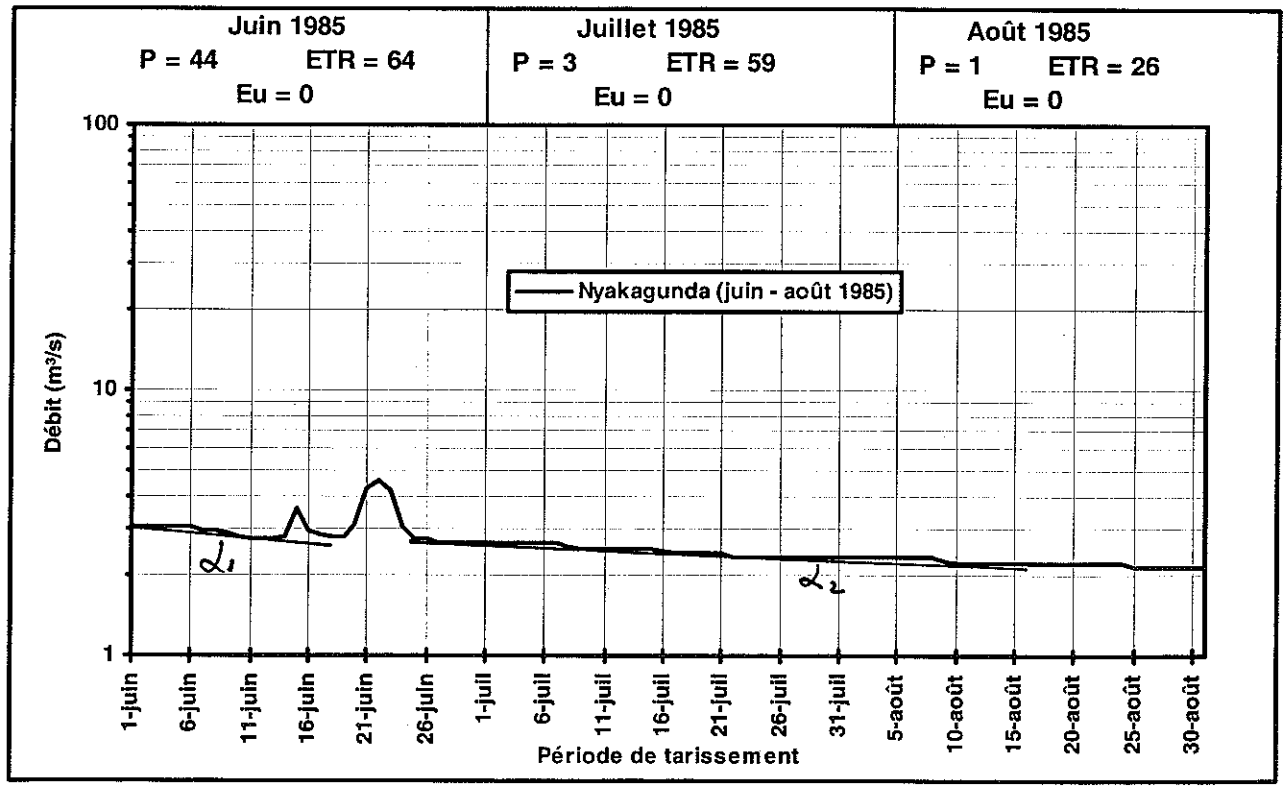
8/6/1982 : Q_0 = 3.28 m³/s ; 26/6/1982 ; Q_1 = 2.74 m³/s ; Δt = 18 jrs ; α_1 = 0.00999 jrs^{-1}

26/6/1982 : Q_1 = 2.74 m³/ ; 22/7/1982 ; Q_2 = 2.43 m³/s ; Δt = 26 jrs ; α_2 = 0.00462 jrs^{-1}

2/6/1983: Q_0 = 2.53 m³/s ; 13/6/1983 ; Q_1 = 2.28 m³/s ; Δt = 11 jrs ; α_1 = 0.00946 jrs^{-1}

4/7/1983: Q_1 = 2.17 m³/s ; 19/8/1983 ; Q_2 = 1.84 m³/s ; Δt = 45 jrs ; α_2 = 0.00367 jrs^{-1}



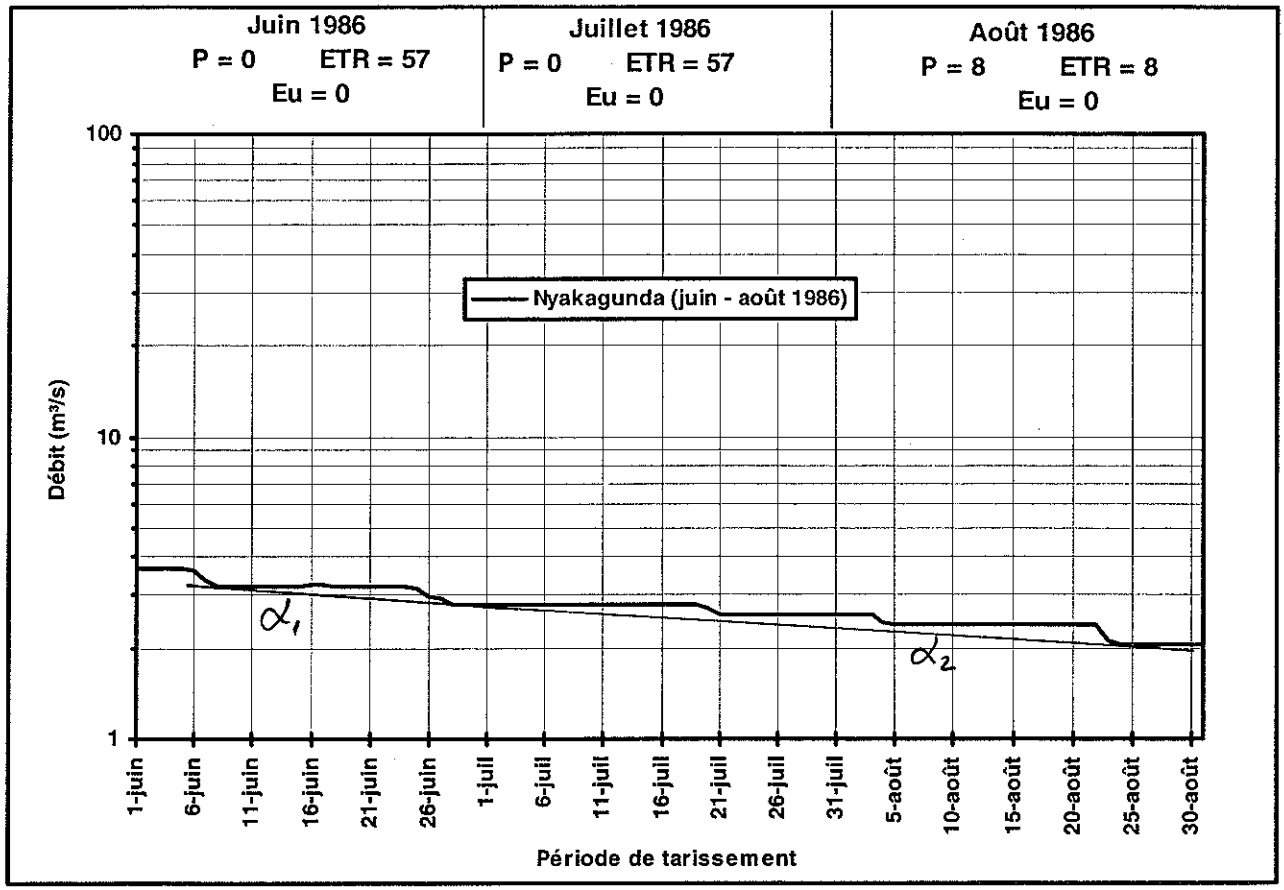


12/6/1984 : Q_0 = 2.01 m³/s ; 19/6/1984 ; Q_1 = 1.82 m³/s ; Δt = 7 jrs ; α_1 = 0.01419 jrs^{-1}

19/6/1984 : Q_1 = 1.82 m³/s ; 13/8/1984 ; Q_2 = 1.46 m³/s ; Δt = 55 jrs ; α_2 = 0.00401 jrs^{-1}

1/6/1985 : Q_0 = 3.06 m³/s ; 12/6/1985 ; Q_1 = 2.74 m³/s ; Δt = 11 jrs ; α_1 = 0.01004 jrs^{-1}

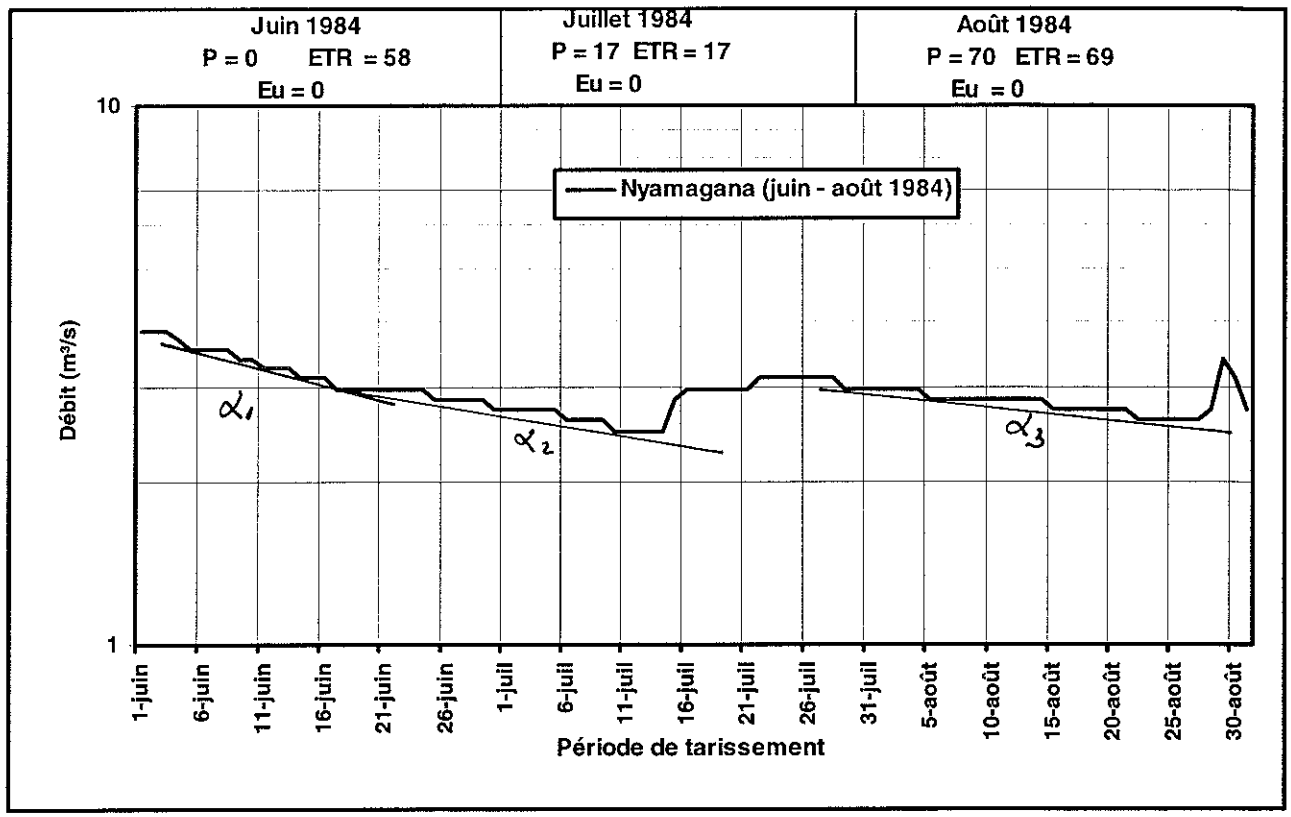
25/6/1985 : Q_1 = 2.74 m³/s ; 9/8/1985 ; Q_2 = 2.26 m³/s ; Δt = 45 jrs ; α_2 = 0.00428 jrs^{-1}



7/6/1986: Q_0 = 3.36 m³/s ; 28/6/1986 ; Q_1 = 2.78 m³/s ; Δt = 21 jrs ; α_1 = 0.00902 jrs^{-1}

28/6/1986: Q_1 = 2.78 m³/s ; 24/8/1986 ; Q_2 = 2.06 m³/s ; Δt = 57 jrs ; α_2 = 0.00526 jrs^{-1}

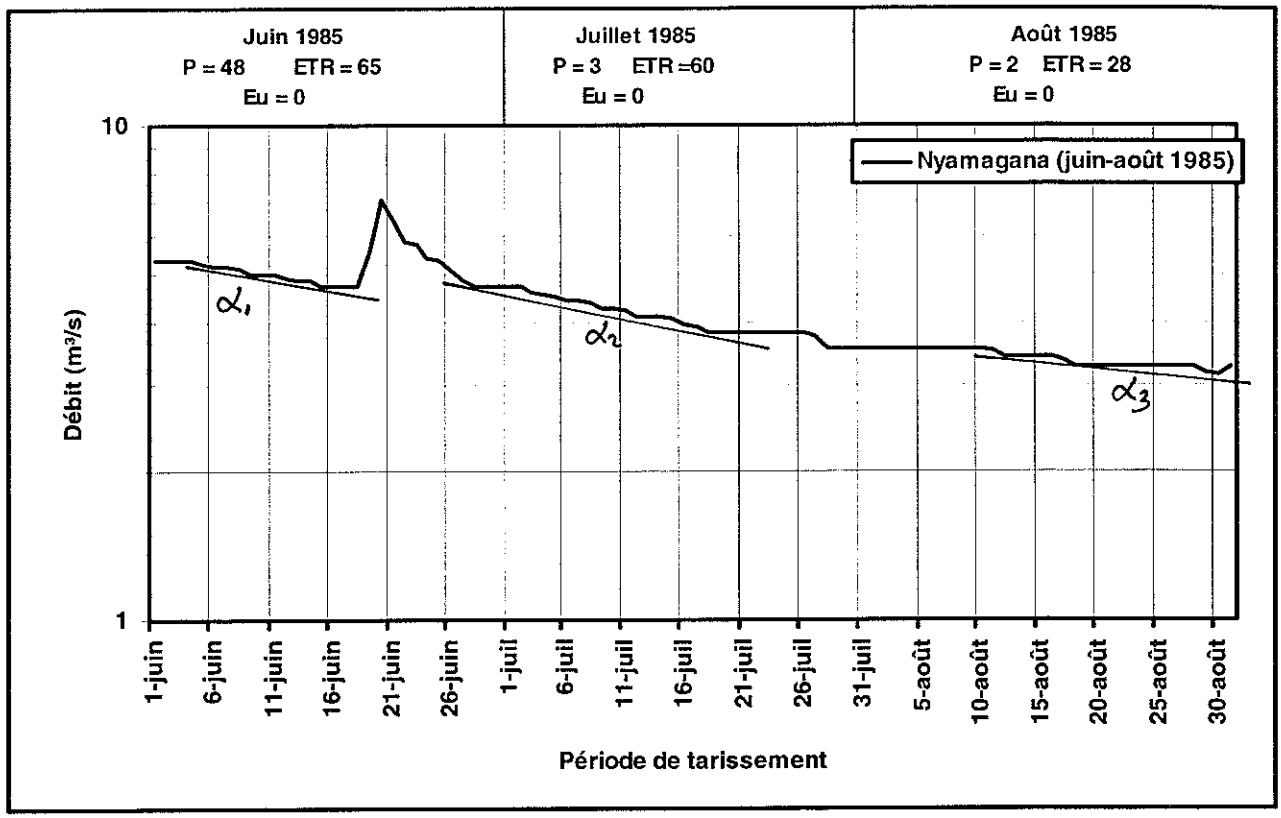
Annexe VI.2: Courbes de tarissement de la Nyamagana (1983-1987)



5/6/1984: Q_0 = 3.51 m³/s ; 17/6/1984 ; Q_1 = 2.99 m³/s ; Δt = 12 jrs ; α_1 = 0.01407 jrs^{-1}

17/6/1984: Q_1 = 2.99 m³/s ; 10/7/1984 ; Q_2 = 2.48 m³/s ; Δt = 23 jrs ; α_2 = 0.00785 jrs^{-1}

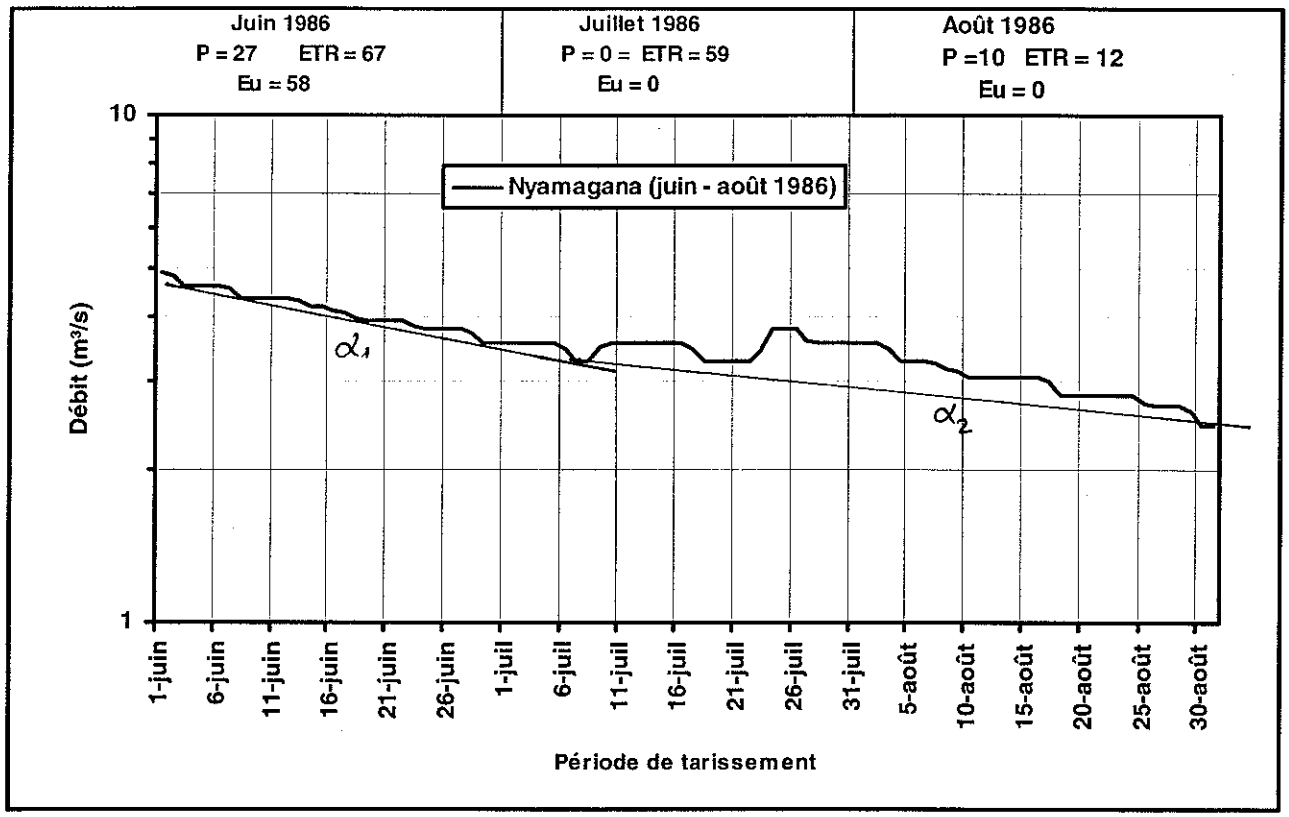
29/7/1984: Q_3 = 2.99 m³/s ; 22/8/1984 ; Q_4 = 2.61 m³/s ; Δt = 24 jrs ; α_3 = 0.00566 jrs^{-1}



4/6/1985: Q_0 = 5.34 m³/s ; 16/6/1985 ; Q_1 = 4.71 m³/s ; Δt = 12 jrs ; α_1 = 0.01046 jrs^{-1}

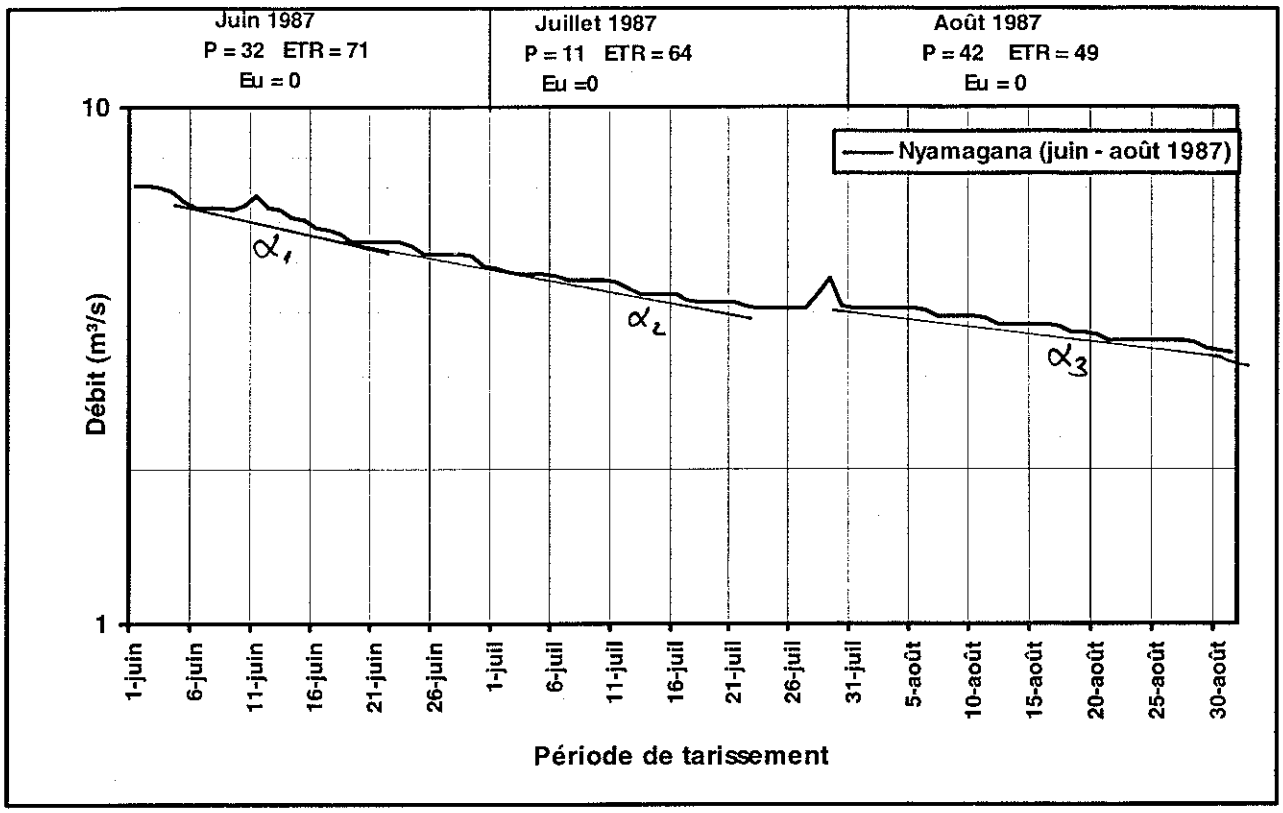
28/6/1985: Q_1 = 4.71 m³/s ; 28/7/1985 ; Q_2 = 3.54 m³/s ; Δt = 30 jrs ; α_2 = 0.00952 jrs^{-1}

12/8/1985: Q_3 = 3.4 m³/s ; 30/8/1985 ; Q_4 = 3.13 m³/s ; Δt = 18 jrs ; α_3 = 0.00460 jrs^{-1}



7/6/1986: Q_0 = 4.55 m³/s ; 7/7/1986 ; Q_1 = 3.29 m³/s ; Δt = 30 jrs ; α_1 = 0.01081 jrs^{-1}

7/7/1986: Q_1 = 3.29 m³/s ; 30/8/1986 ; Q_2 = 2.45 m³/s ; Δt = 54 jrs ; α_2 = 0.00546 jrs^{-1}

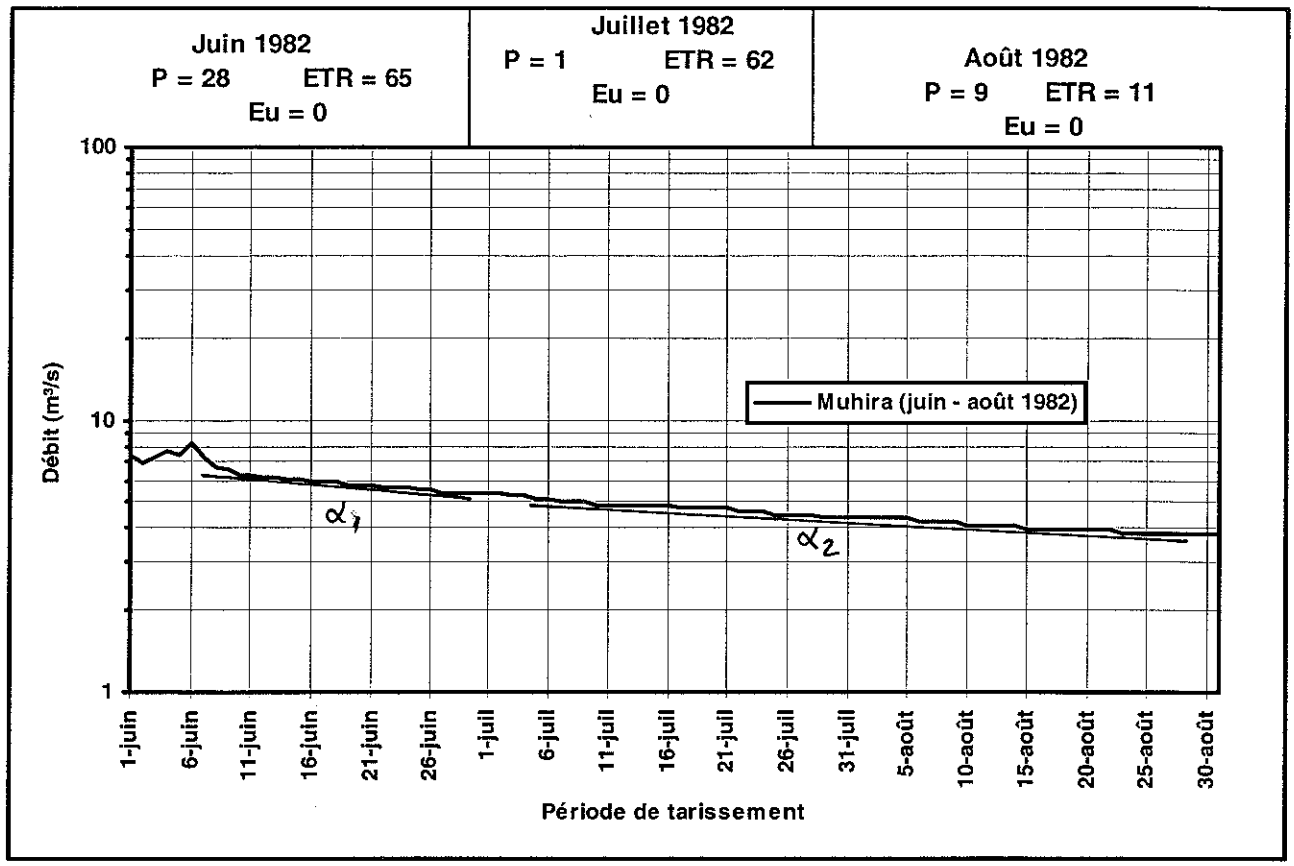


6/6/1987: Q_0 = 6.39 m³/s ; 19/6/1987 ; Q_1 = 5.48 m³/s ; Δt = 13 jrs ; α_1 = 0.01182 jrs^{-1}

19/6/1987: Q_1 = 5.48 m³/s ; 23/7/1987 ; Q_2 = 4.07 m³/s ; Δt = 34 jrs ; α_2 = 0.00875 jrs^{-1}

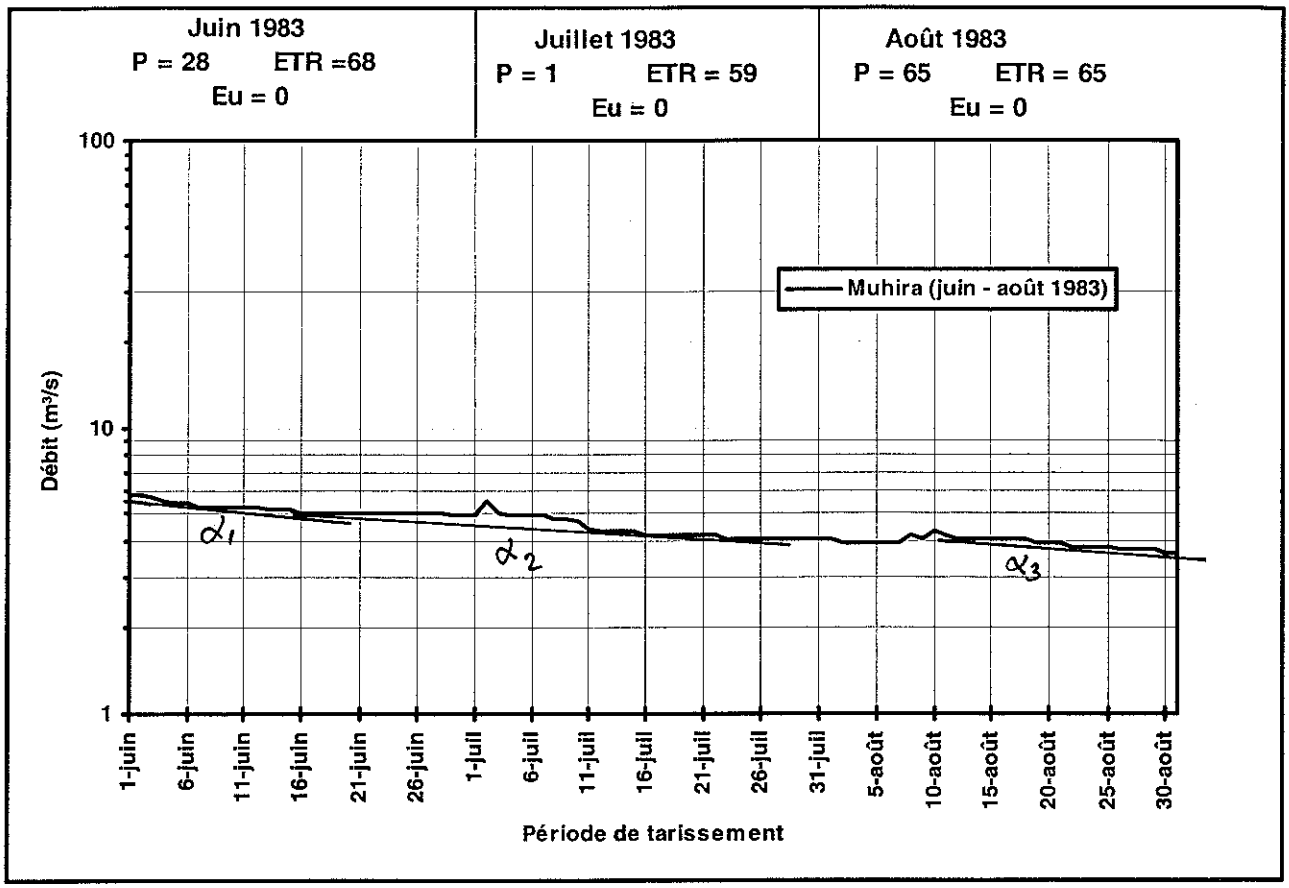
31/7/1987: Q_3 = 4.07 m³/s ; 31/8/1987 ; Q_4 = 3.36 m³/s ; Δt = 31 jrs ; α_2 = 0.00618 jrs^{-1}

Annexe VI.3 : Courbes de tarissement de la Muhira



10/6/1982: Q_0 = 6.32 m³/s ; 27/6/1982 ; Q_1 = 5.4 m³/s ; Δt = 17 jrs ; α_1 = 0.00925 jrs^{-1}

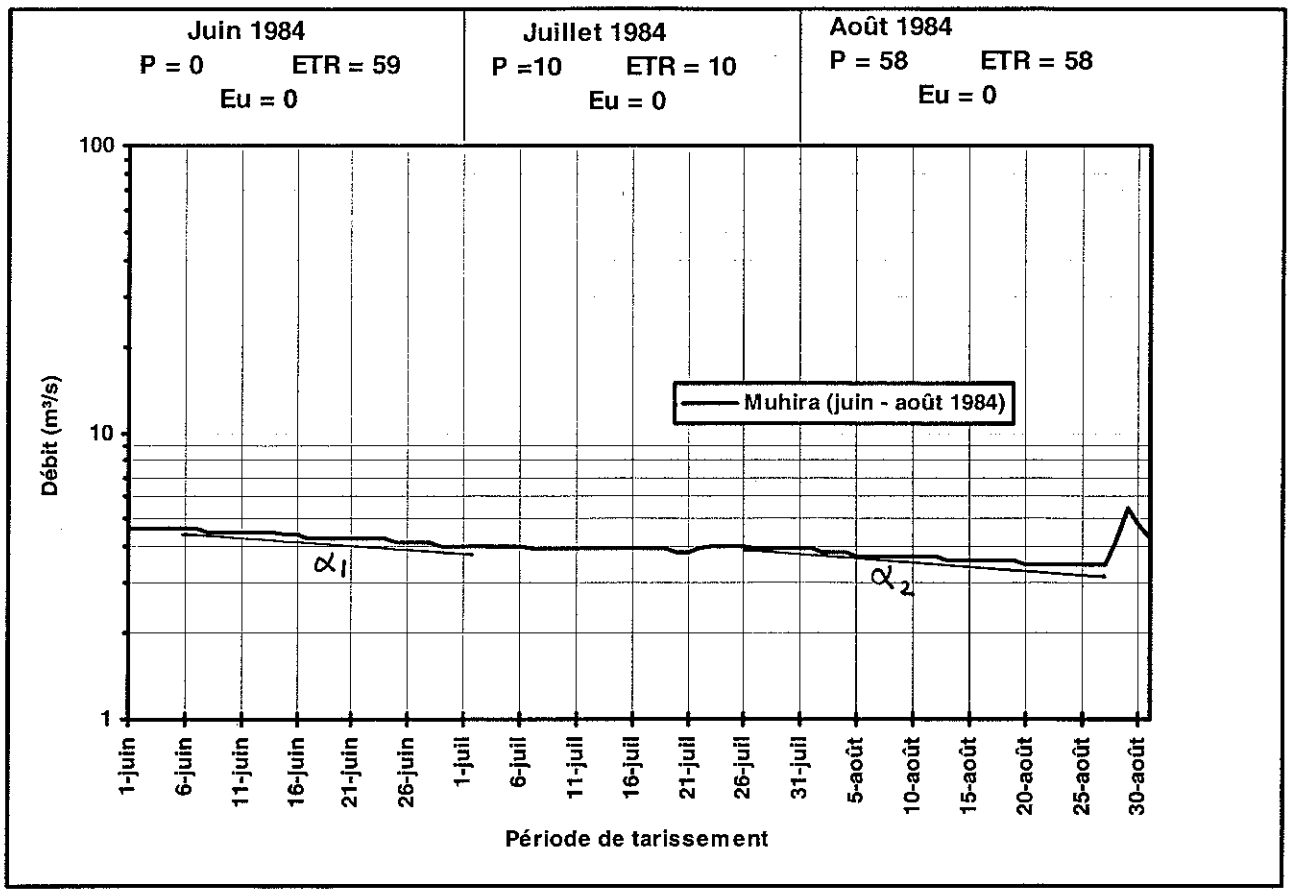
5/7/1982: Q_1 = 5.14 m³/s ; 23/8/1982 ; Q_2 = 3.86 m³/s ; Δt = 47 jrs ; α_2 = 0.00609 jrs^{-1}



1/6/1983: Q_0 = 5.82 m³/s ; 16/6/1983 ; Q_1 = 5.07 m³/s ; Δt = 15 jrs ; α_1 = 0.00827 jrs^{-1}

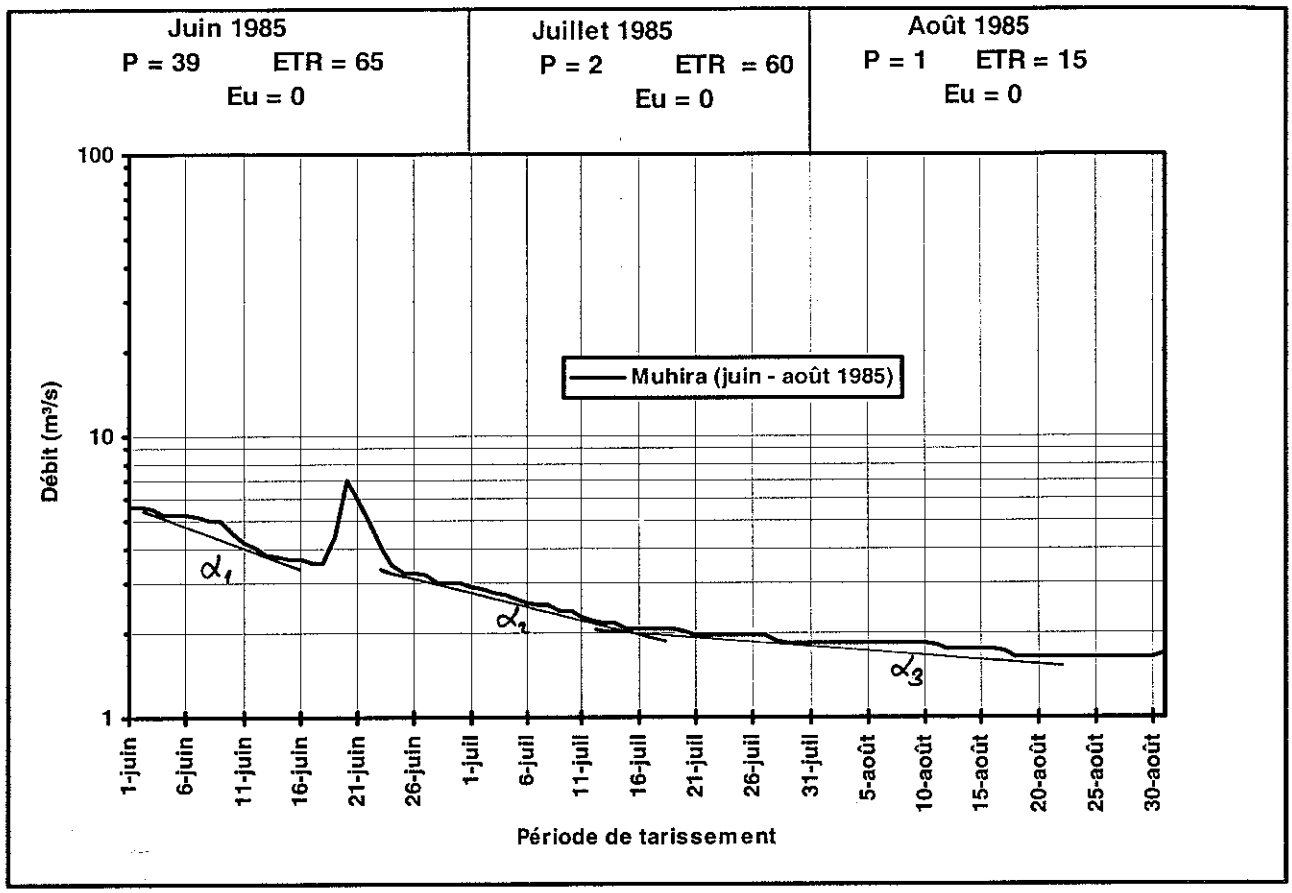
16/6/1983: Q_1 = 5.07 m³/s ; 23/7/1983 ; Q_2 = 4.09 m³/s ; Δt = 37 jrs ; α_2 = 0.00581 jrs^{-1}

12/8/1983: Q_3 = 4.09 m³/s ; 30/8/1983 ; Q_4 = 3.62 m³/s ; Δt = 18 jrs ; α_3 = 0.00678 jrs^{-1}



8/6/1984: Q_0 = 4.52 m³/s ; 29/6/1984 ; Q_1 = 4.04 m³/s ; Δt = 21 jrs ; α_1 = 0.00535 jrs^{-1}

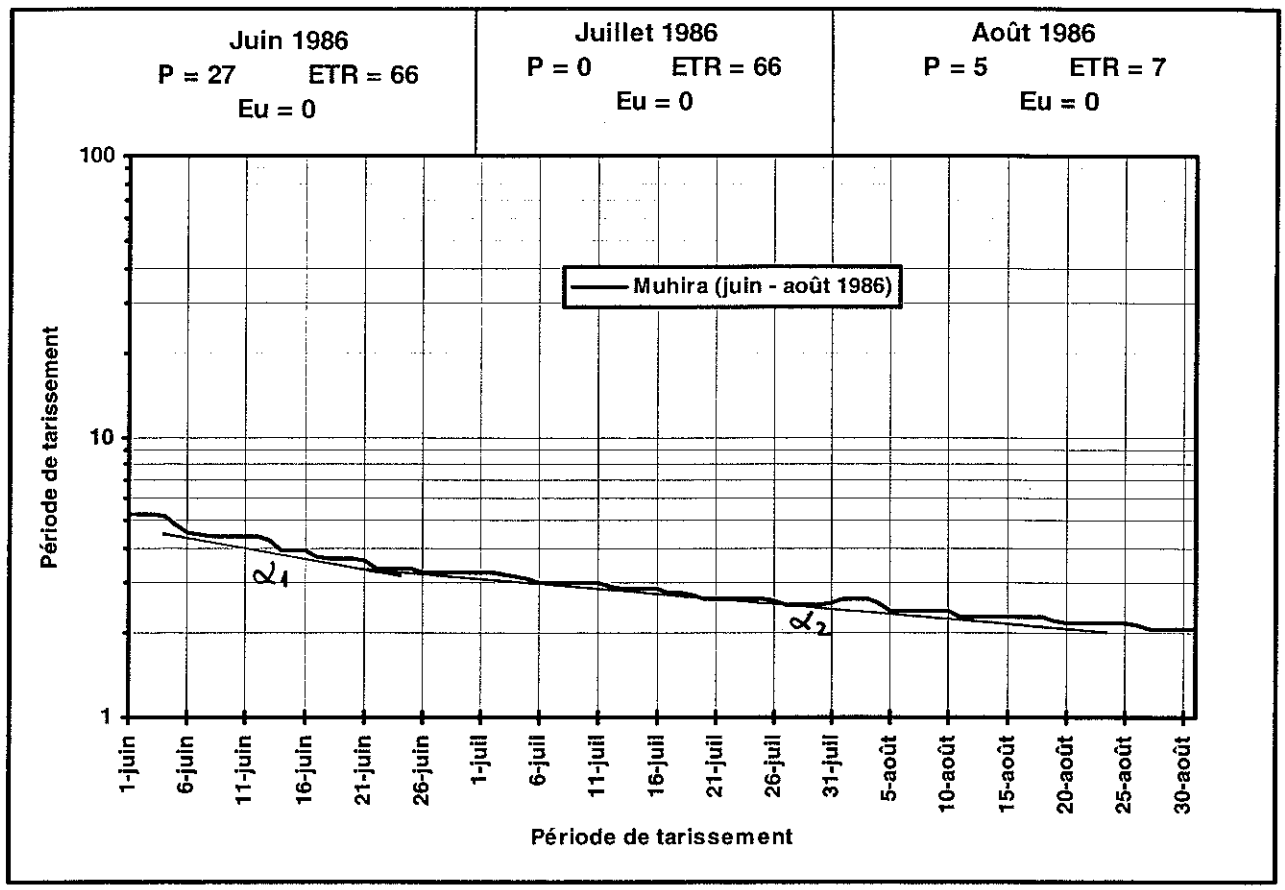
27/7/1984: Q_1 = 3.92 m³/s ; 20/8/1984; Q_2 = 3.45 m³/s ; Δt = 24 jrs ; α_2 = 0.00532 jrs^{-1}



1/6/1985 : Q_0 = 5.62 m³/s ; 15/6/1985 ; Q_1 = 3.68 m³/s ; Δt = 14 jrs ; α_1 = 0.03024 jrs^{-1}

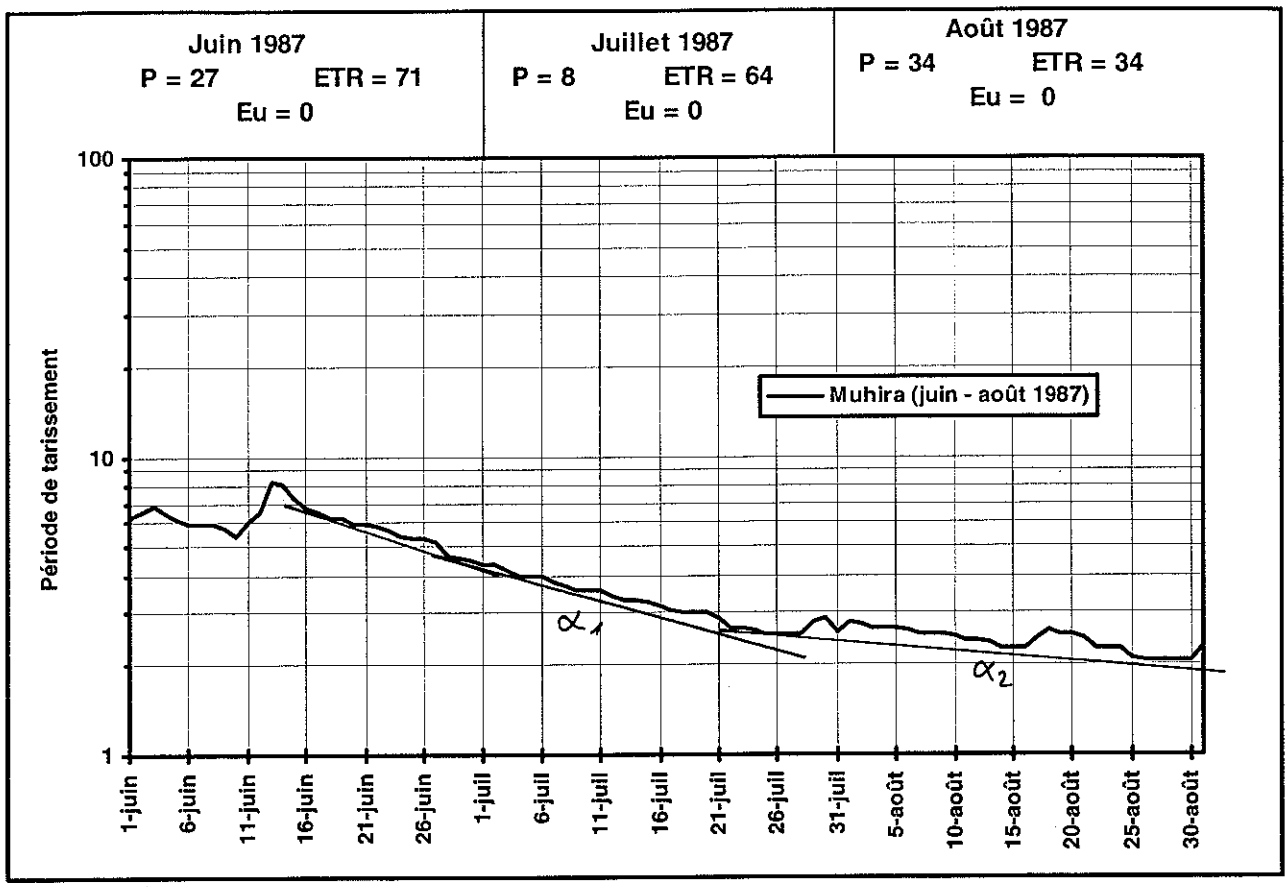
25/6/1985 : Q_1 = 3.28 m³/s ; 15/7/1985 ; Q_2 = 2.07 m³/s ; Δt = 20 jrs ; α_2 = 0.02301 jrs^{-1}

15/7/1985: Q_3 = 2.07 m³/s ; 18/8/1985 ; Q_4 = 1.65 m³/s ; Δt = 34 jrs ; α_3 = 0.00667 jrs^{-1}



6/6/1986 : Q_0 = 4.54 m³/s ; 22/6/1986 ; Q_1 = 3.41 m³/s ; Δt = 16jrs ; α_1 = 0.01789 jrs^{-1}

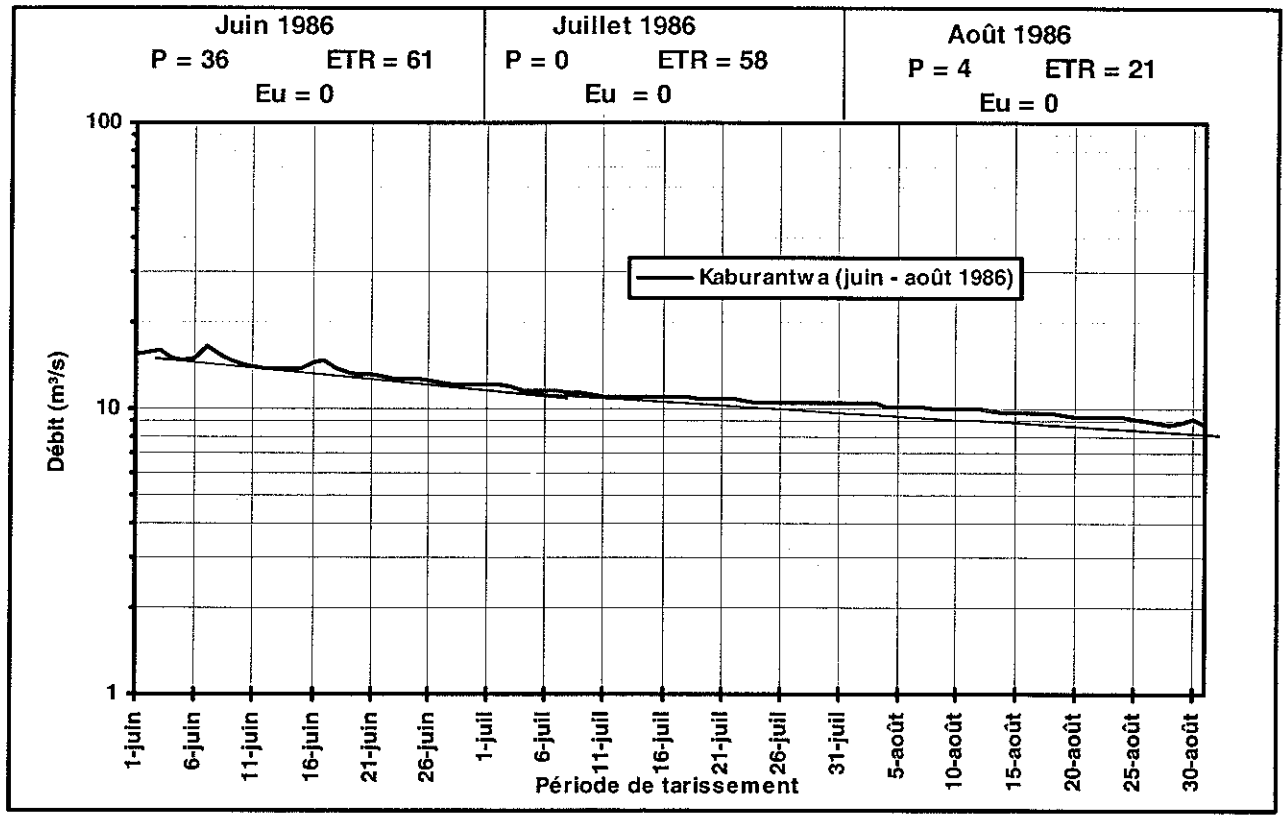
22/6/1986 : Q_1 = 3.41 m³/s ; 27/8/1986; Q_2 = 2.07 m³/s ; Δt = 66 jrs ; α_2 = 0.00756 jrs^{-1}



18/6/1987 : Q_0 = 6.27 m³/s ; 22/7/1987 ; Q_1 = 2.65 m³/s ; Δt = 34 jrs ; α_1 0.02533 jrs^{-1}

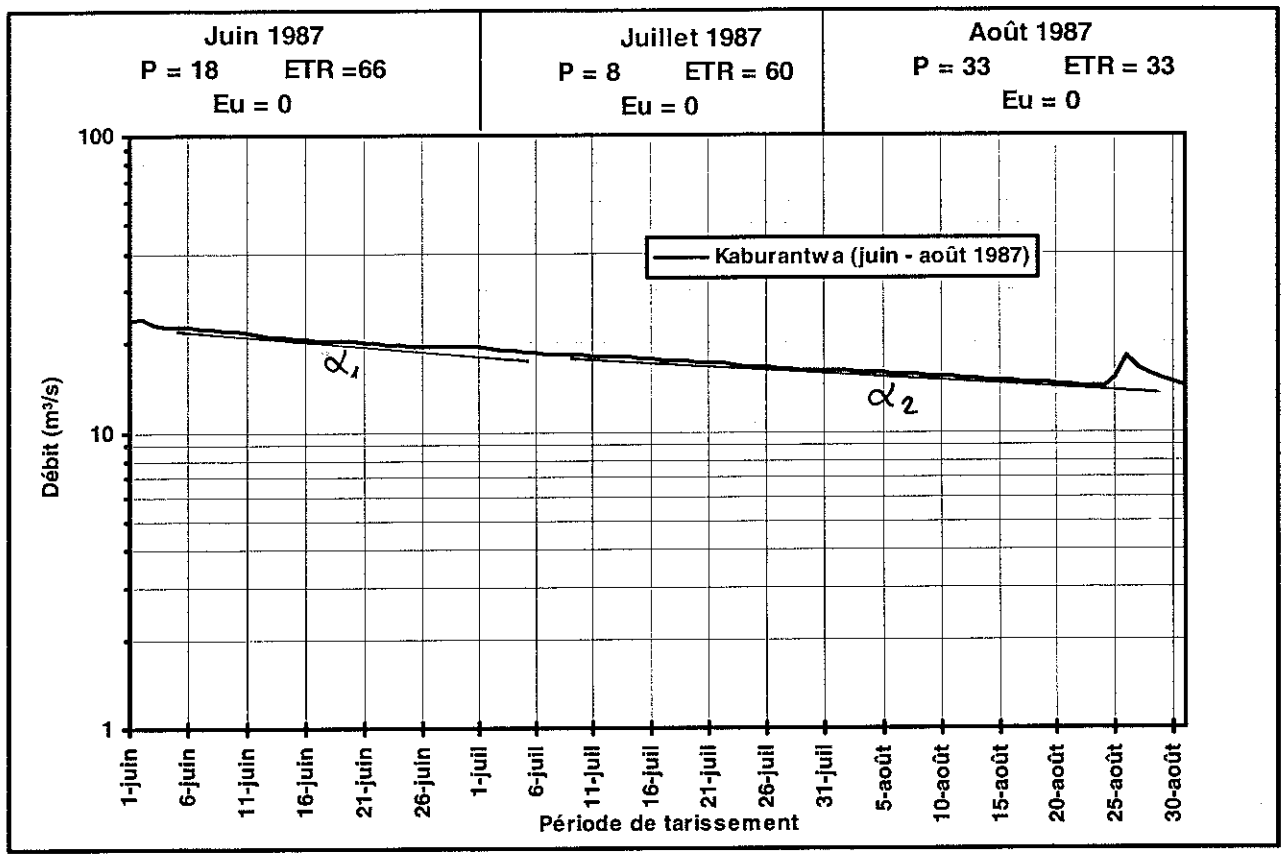
25/7/1987: Q_1 = 2.65 m³/s ; 26/8/1987 ; Q_2 = 2.07 m³/s ; Δt = 32 jrs ; α_2 = 0.00772 jrs^{-1}

Annexe VI.4 : Courbes de tarissement de la Kaburantwa



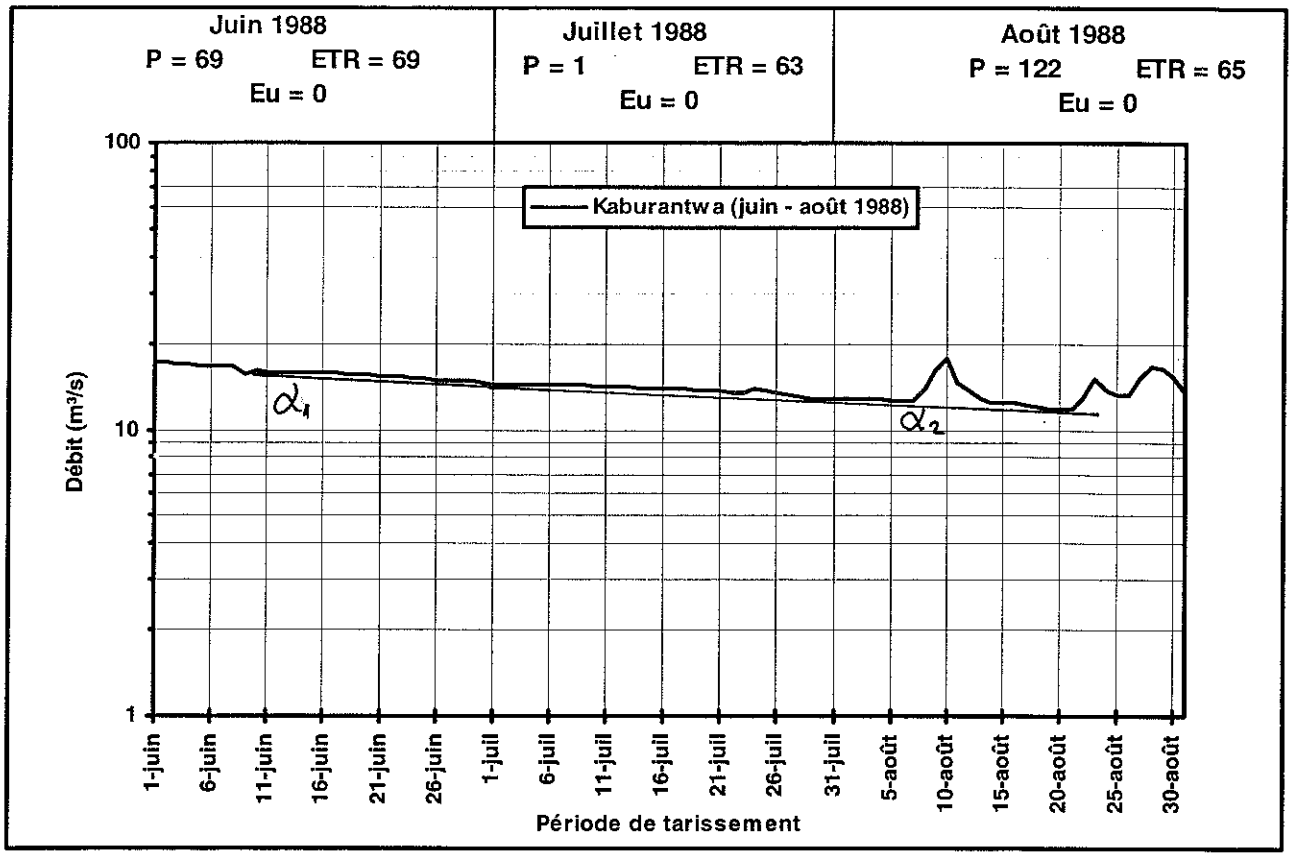
4/6/1986: Q_0 = 15.07 m³/s ; 4/7/1986 ; Q_1 = 11.62 m³/s ; Δt = 30 jrs ; α_1 = 0.01003 jrs^{-1}

4/7/1986: Q_1 = 11.62 m³/s ; 28/8/1986 ; Q_2 = 8.75 m³/s ; Δt = 55 jrs ; α_2 = 0.00516 jrs^{-1}



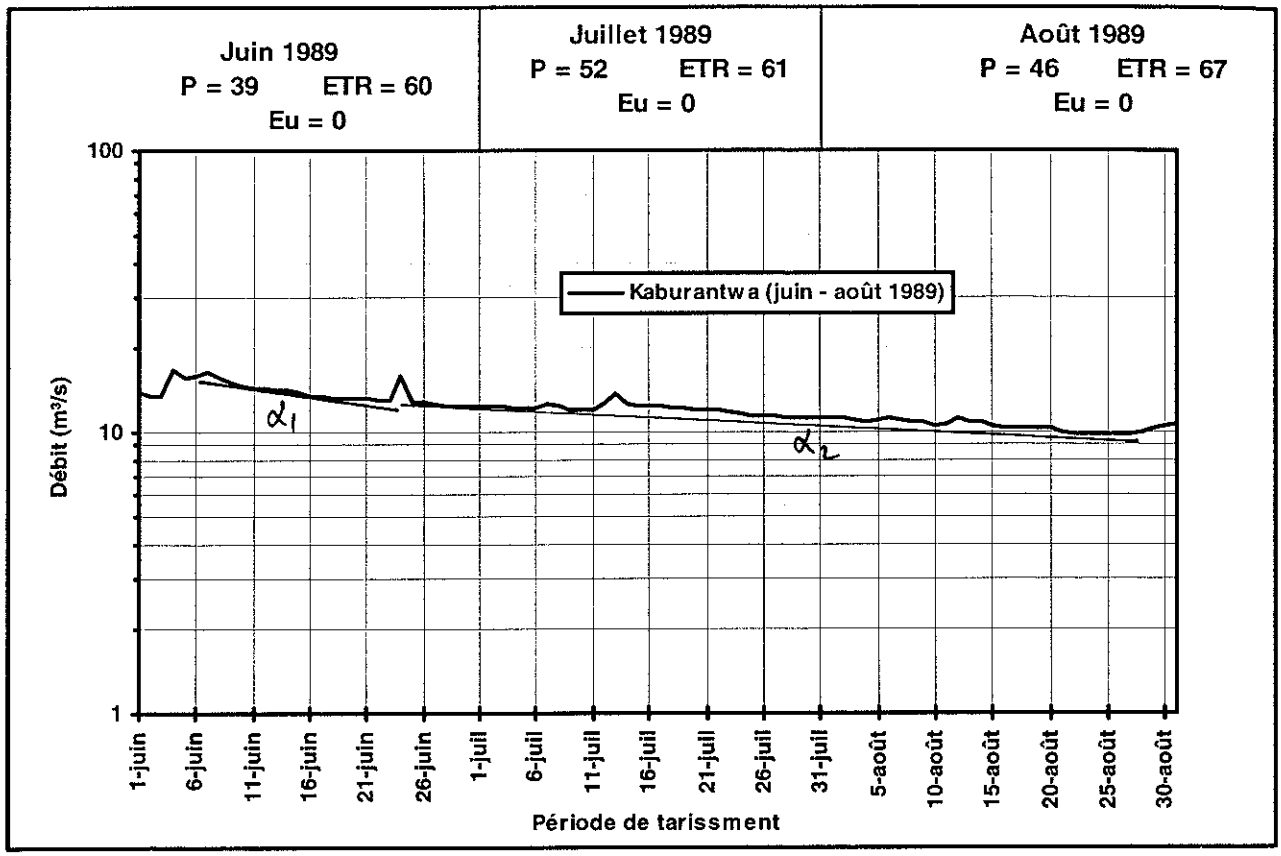
3/6/1987: Q_0 = 23.08 m³/s ; 16/6/1987 ; Q_1 = 20.55 m³/s ; Δt = 13 jrs ; α_1 = 0.00893 jrs^{-1}

16/6/1987: Q_1 = 20.55 m³/s ; 22/8/1987 ; Q_2 = 14.22 m³/s ; Δt = 67 jrs ; α_2 = 0.00550 jrs^{-1}



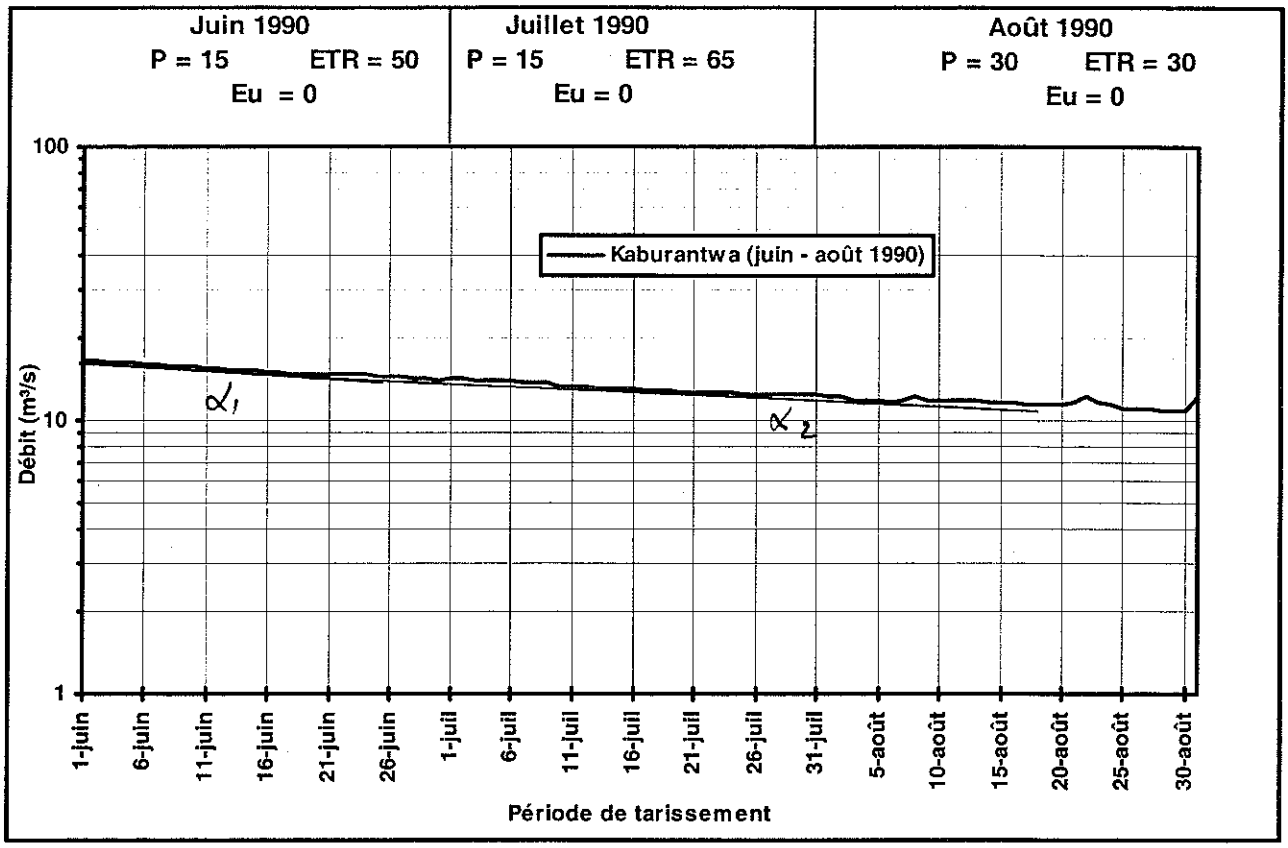
11/6/1988: Q_0 = 15.95 m³/s ; 1/7/1988 ; Q_1 = 14.4 m³/s ; Δt = 21 jrs ; α_1 = 0.00487 jrs^{-1}

10/7/1988: Q_1 = 14.16 m³/s ; 21/8/1988 ; Q_2 = 11.8 m³/s ; Δt = 42 jrs ; α_2 = 0.00434 jrs^{-1}



9/6/1989: Q_0 = 15.21 m³/s ; 21/6/1989; Q_1 = 12.95 m³/s ; Δt = 12 jrs ; α_1 = 0.01340 jrs^{-1}

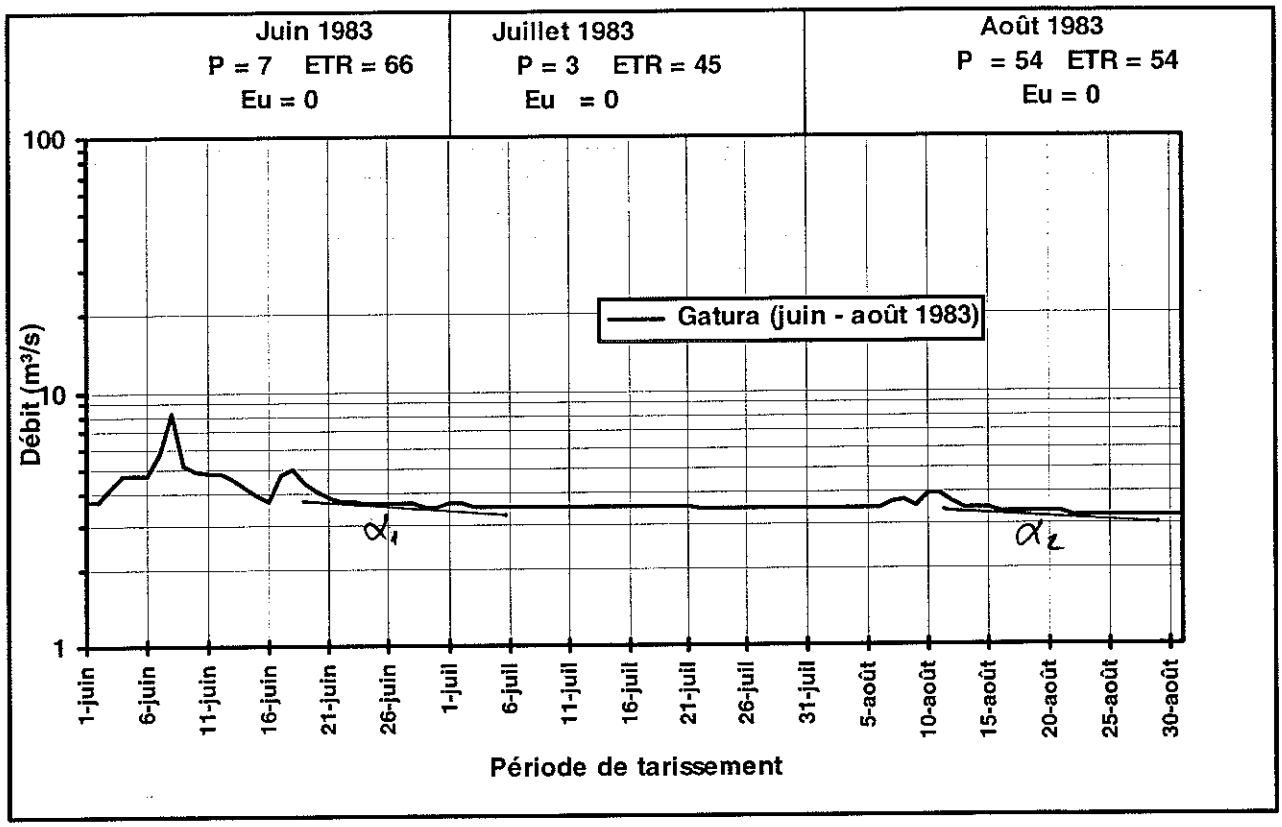
21/6/1989: Q_1 = 12.95 m³/s ; 23/8/1989 ; Q_2 = 9.79 m³/s ; Δt = 63 jrs ; α_2 = 0.00444 jrs^{-1}



2/6/1990: Q_0 = 16.69 m³/s ; 16/6/1990; Q_1 = 15.11 m³/s ; Δt = 14 jrs ; α_1 = 0.00710 jrs^{-1}

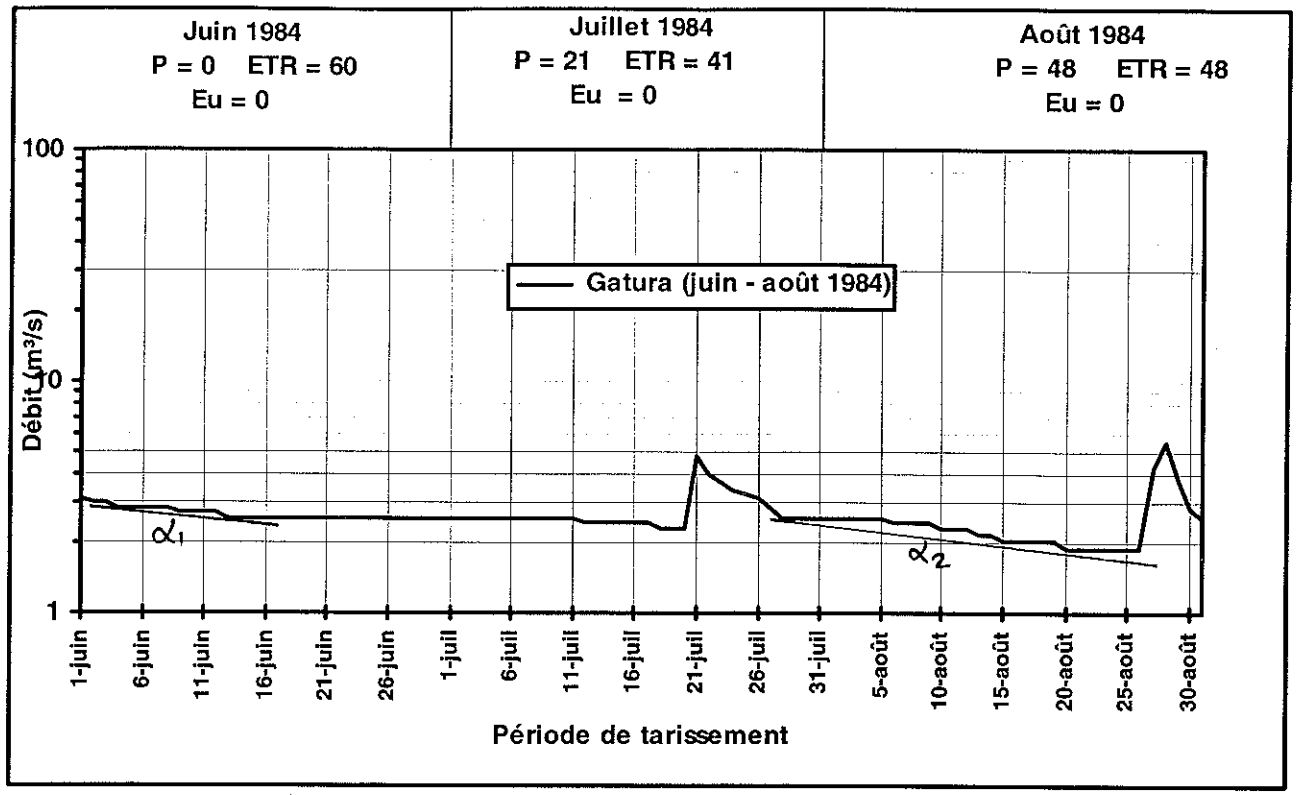
21/6/1990: Q_1 = 15.11 m³/s ; 17/8/1990 ; Q_2 = 11.42 m³/s ; Δt = 62 jrs ; α_2 = 0.00452 jrs^{-1}

Annexe VI.5 : Courbes de tarissement de la Mpanda à Gatura



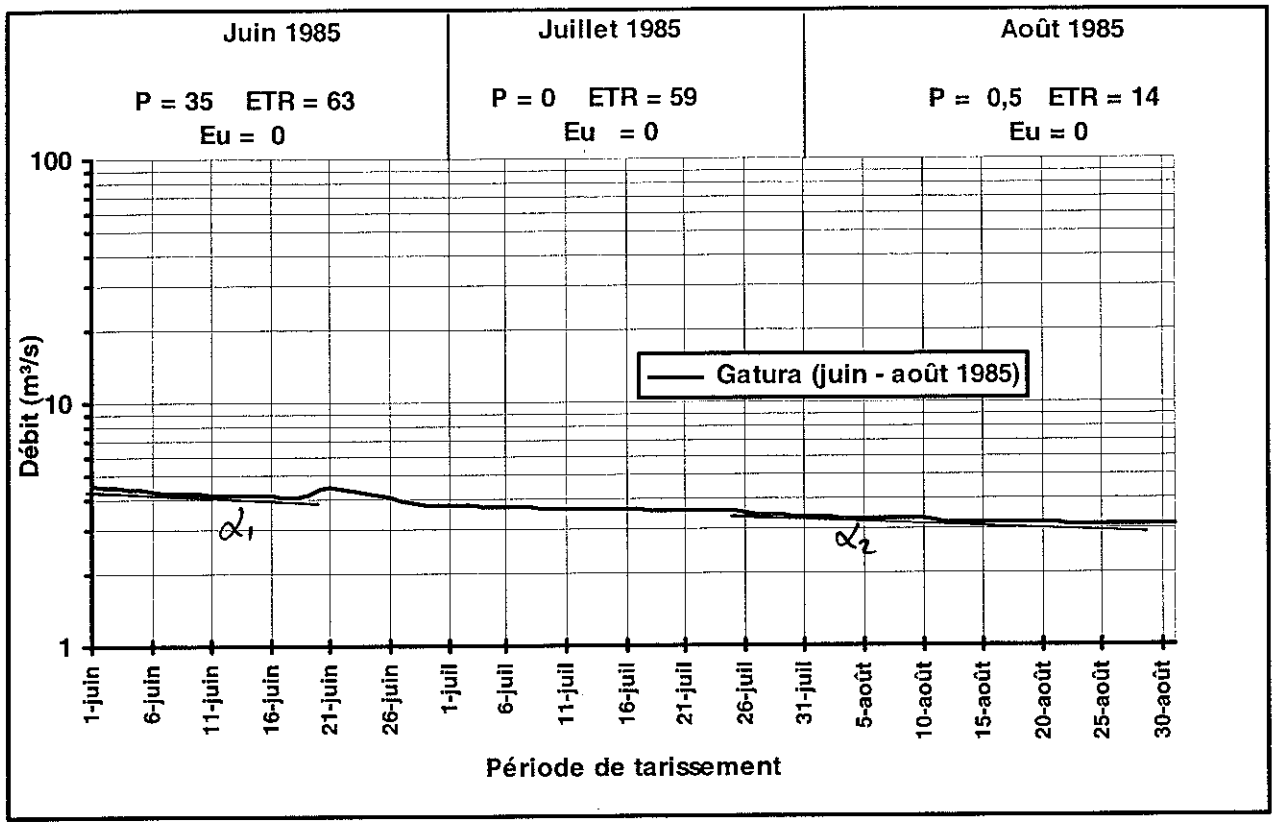
22/6/1983: Q_0 = 3.73 m³/s ; 27/6/1983 ; Q_1 = 3.52 m³/s ; Δt = 7 jrs ; α_1 = 0.00828 jrs^{-1}

13/8/1983 : Q_1 = 3.42 m³/s ; 22/8/1983 ; Q_2 = 3.21 m³/s ; Δt = 9 jrs ; α_2 = 0.00704 jrs^{-1}



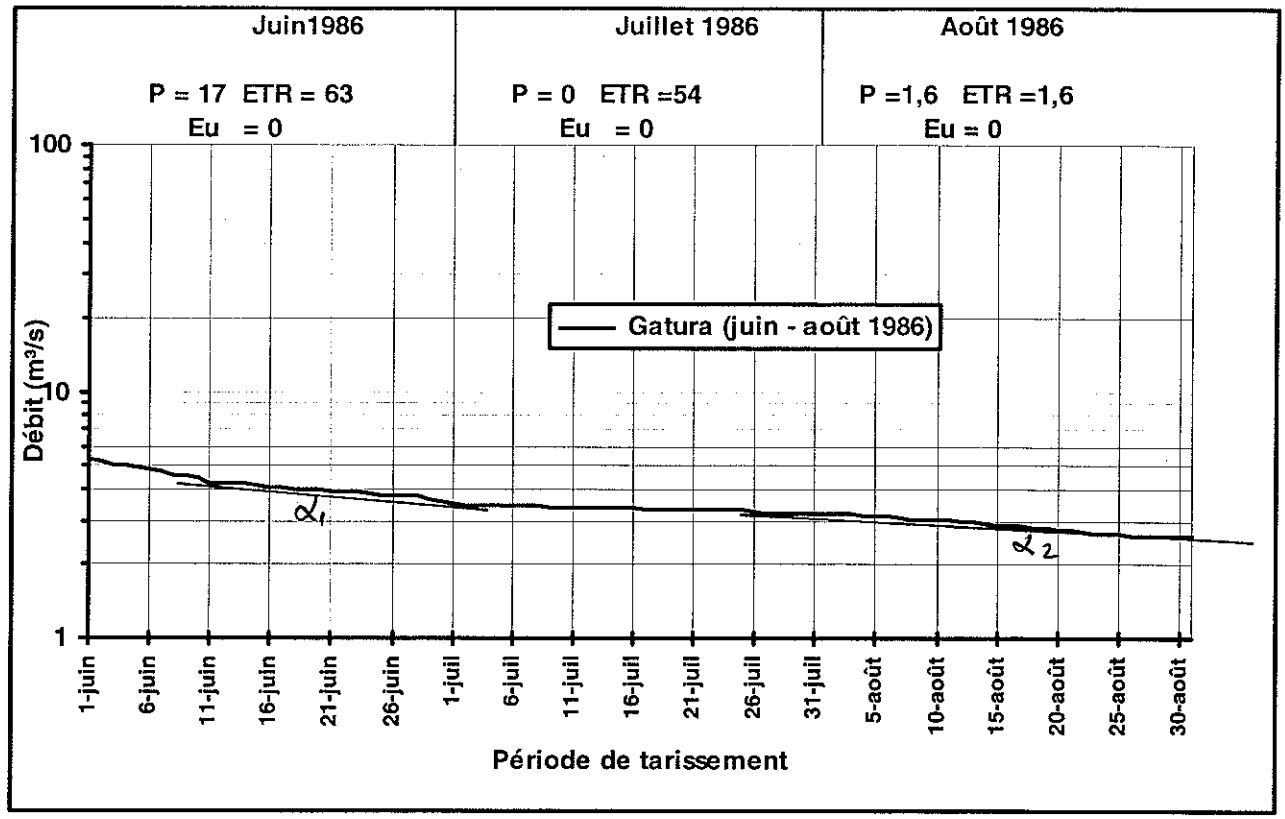
4/6/1984: Q_0 = 2.85 m³/s ; 13/6/1984 ; Q_1 = 2.58 m³/s ; Δt = 9 jrs ; α_1 = 0.01106 jrs^{-1}

28/7/1984 : Q_1 = 2.58 m³/s ; 20/8/1984 ; Q_2 = 1.9 m³/s ; Δt = 28 jrs ; α_2 = 0.01093 jrs^{-1}



1/6/1985 : Q_0 = 4.57 m³/s ; 11/6/1985; Q_1 = 4.19 m³/s ; Δt = 10 jrs ; α_1 = 0.00868 jrs^{-1}

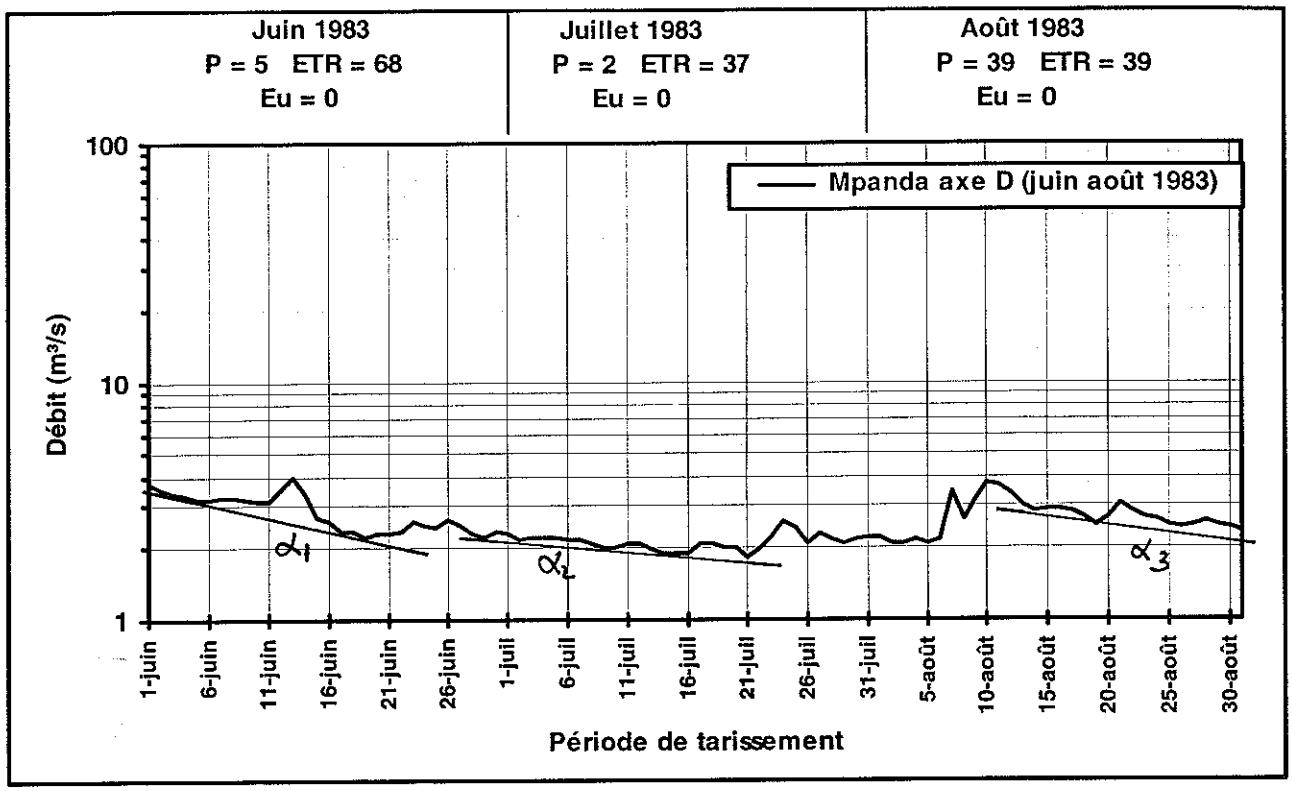
25/7/1985 : Q_1 = 3.55 m³/s ; 4/8/1985 ; Q_2 = 3.3 m³/s ; Δt = 10 jrs ; α_2 = 0.00730 jrs^{-1}



11/6/1986 : Q_0 = 5.28 m³/s ; 1/7/1986 ; Q_1 = 3.51 m³/s ; Δt = 20 jrs ; α_1 = 0.00992 jrs^{-1}

26/7/1986 : Q_1 = 3.26 m³/s ; 27/8/1986 ; Q_2 = 2.59 m³/s ; Δt = 32 jrs ; α_2 = 0.00719 jrs^{-1}

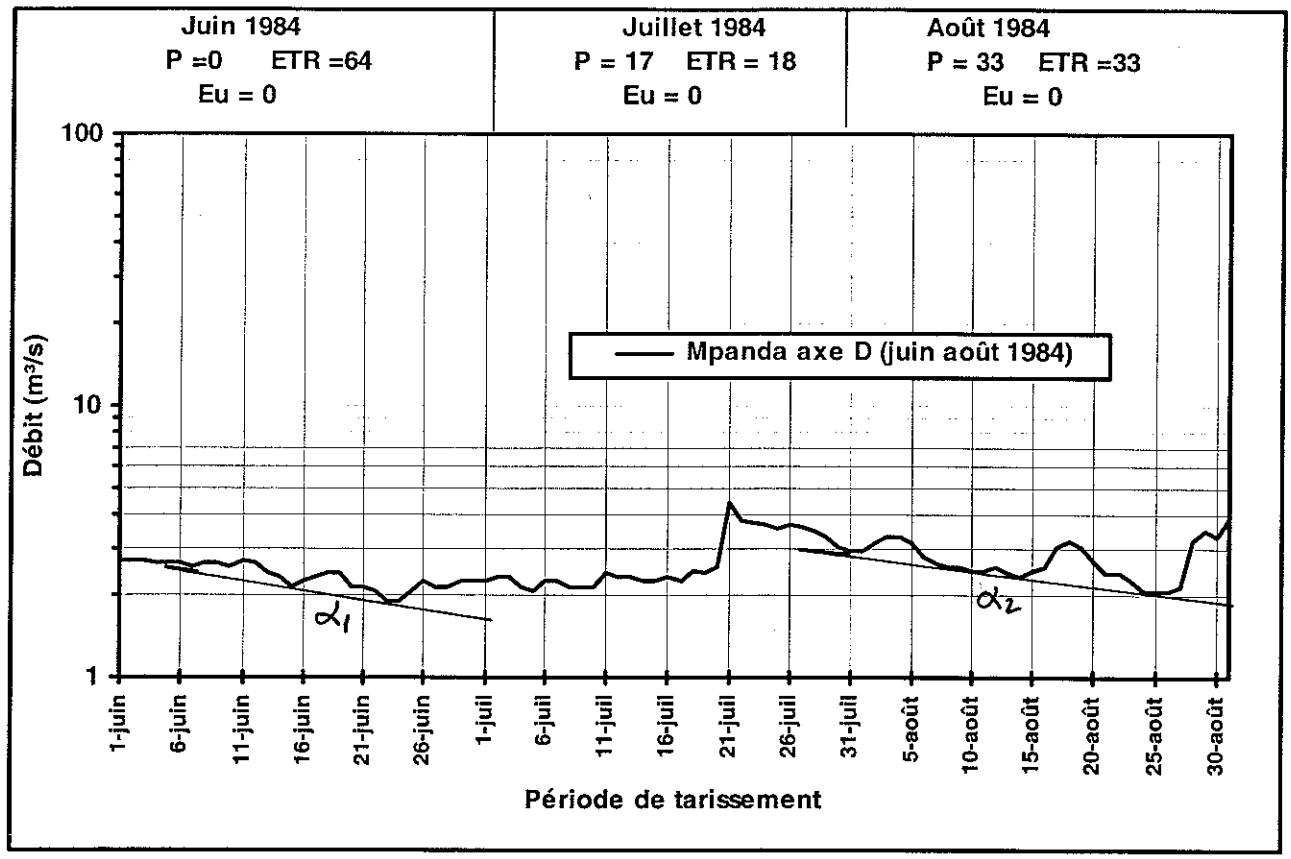
Annexe VI.6 : Courbes de tarissement de la Mpanda à l'axe D



1/6/1983: Q_0 = 3.72 m³/s ; 19/6/1983 ; Q_1 = 2.23 m³/s ; Δt = 18 jrs ; α_1 = 0.02843 jrs^{-1}

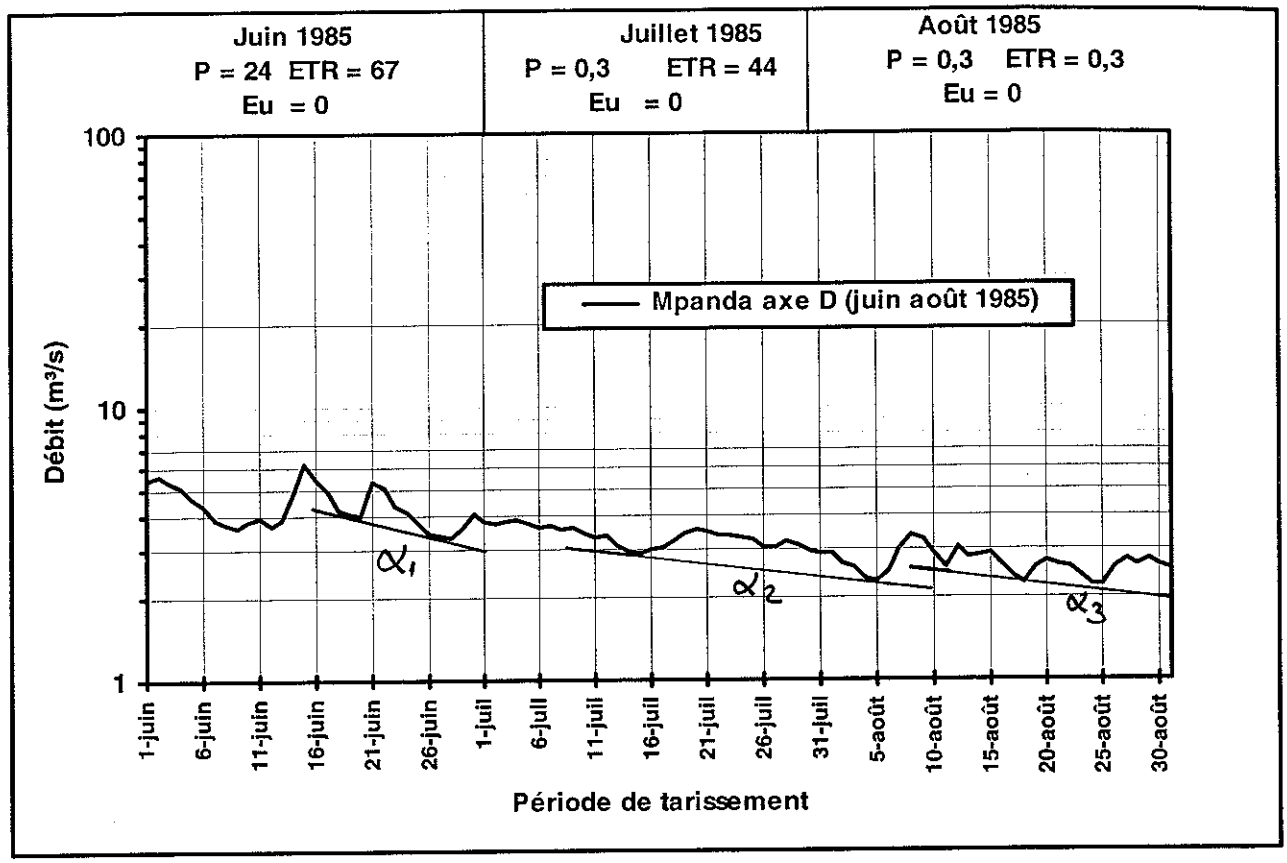
29/6/1983 : Q_1 = 2.23 m³/s ; 21/7/1983 ; Q_2 = 3.21 m³/s ; Δt = 22 jrs ; α_2 = 0.00899 jrs^{-1}

14/8/1983 : Q_3 = 2.86 m³/s ; 31/8/1983 ; Q_4 = 2.37 m³/s ; Δt = 17 jrs ; α_3 = 0.001105 jrs^{-1}



7/6/1984: Q_0 = 2.55 m³/s ; 23/6/1984 ; Q_1 = 1.92 m³/s ; Δt = 16 jrs ; α_1 = 0.01774 jrs^{-1}

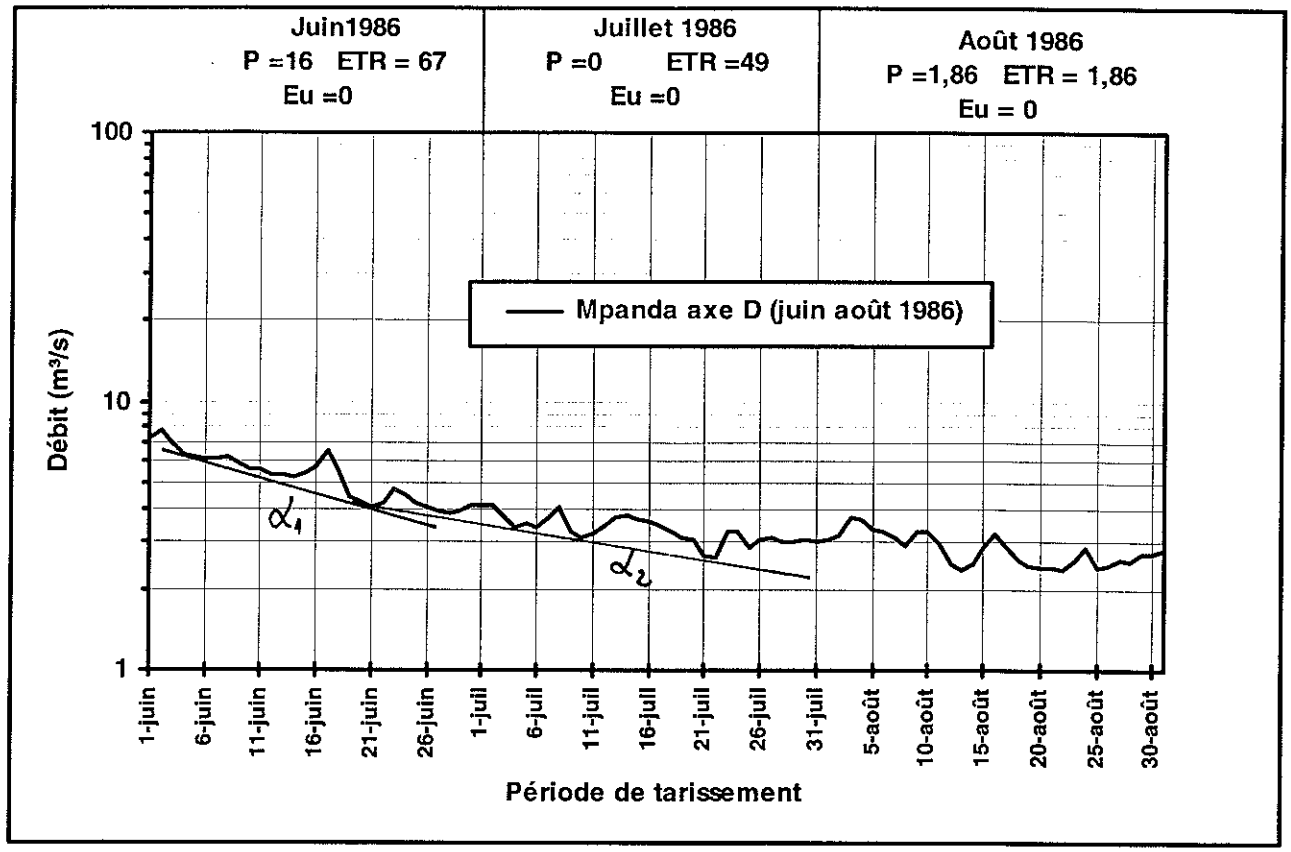
31/7/1984 : Q_1 = 2.91 m³/s ; 24/8/1984 ; Q_2 = 2.09 m³/s ; Δt = 24 jrs ; α_2 = 0.01379 jrs^{-1}



18/6/1985: Q_0 = 4.25 m³/s ; 28/6/1985 ; Q_1 = 3.35 m³/s ; Δt = 10 jrs ; α_1 = 0.02380 jrs^{-1}

1/7/1985 : Q_1 = 3.78 m³/s ; 5/8/1985 ; Q_2 = 2.3 m³/s ; Δt = 35 jrs ; α_2 = 0.01419 jrs^{-1}

11/8/1985 : Q_3 = 2.6 m³/s ; 24/8/1985 ; Q_4 = 2.23 m³/s ; Δt = 13 jrs ; α_3 = 0.01181 jrs^{-1}



4/6/1986: Q_0 = 6.33 m³/s ; 21/6/1986 ; Q_1 = 4.01 m³/s ; Δt = 17 jrs ; α_1 = 0.02685 jrs^{-1}

21/6/1986 : Q_1 = 4.01 m³/s ; 22/7/1986 ; Q_2 = 2.63 m³/s ; Δt = 31 jrs ; α_2 = 0.01361 jrs^{-1}

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACHIROU, D. (1993). Etude des nappes aquifères du continental terminal entre les Dallols Bosso et Maouri. Département de Dosso. République du Niger. Thèse. Université de Liège , 308 pages.

BANDORA, T., (1996). Etude sismique à haute résolution des séquences stratigraphiques et de leurs déformations tectoniques dans les sous bassins de Bujumbura et Rumonge. Lac Tanganyika. Rift Est-Africain. Thèse. Université de Gand , 186 pages.

BANTON, O. et BANGOY, L. avec la collaboration de Chevalier, S., Houénu, P., & Rivard, C. (1997). Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 460 pages.

BEAR,J., & Verruijt, A., (1987), Modeling groundwater flow and pollution, Reidel, 414 pages

BOUTAKOFF, N (1937). Sur l'écoulement vers le Nord du lac Tanganyika au pléistocène. Bull. Ac. Roy. Belgique, Cl. Sc., 5^{e} sér., Tome XXIII, pp 703-715.

BRANCHU, P. (2001). Cycle des éléments majeurs et traces dans les grands lacs de Rift tropicaux (Lacs Tanganyika et Malawi). Processus et enregistrements biogéochimiques. Mus. Roy. Centr., Tervuren (Belg.), Annales – Sciences géologiques – Vol.106, 374 pages.

BRINCKMANN et al. (2001). La Géologie et la Minéralisation Primaire de l'Or de la Chaîne Kibarienne, Nord-Ouest du Burundi, Afrique Orientale. Geologisches Jahrbuch Reihe D, Band D 101.

BROCHET, P. & GERBIER. N (1968). Monographies de la météorologie nationale. L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle.

BUZINGO, E (1972). Etude du projet d'irrigation de la plantation de caféiers Robusta de Kivoga (Burundi). Travail de fin d'études. Faculté des Sciences Agronomiques à Gembloux.

CAHEN, L.& LEPERSONNE, J. (1967). The Precambrian of the Congo, Rwanda and Burundi. In : Rankama K. (Ed). The Precambrian, vol.3, Interscience Publ. London, 143-290.

CAHEN L. and SNELLING N.J. (1974). Potassium-argon and additions to the stratigraphy of Malagarasien (Bukoban system of Tanzania) of S.E. Burundi. Quart. Journ. Geol. Soc. 130, 461-470.

CAHEN L. and SNELLING N.J., DELHAL,J. & Vail, J. (1984). The geochronology and evolution of Africa. Clarendon Press, Oxford, 512 pages.

CASENAVE, F (1979). Climat du Burundi (in Atlas du Burundi). Edition de 1979, Paris.

CASTANY,G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université, 237 pages.

CHOROWICZ, J & NA BANTU MUKONKI, M (1979). Mise en évidence d'une compression horizontale liée à l'ouverture des fossés Est-africains (branche occidentale), dans le seuil entre les lacs Kivu et Tanganyika. C.R.somm. Soc. Géol.Fr, fasc.5-6.

CHOROWICZ, J & NA BANTU MUKONKI, M (1980). Linéaments anciens, zones transformantes récentes et géotectonique des fossés de l'Est africain, d'après la télédétection et la microtectonique. Mus. Roy. Centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1979. pp 143-167.

CHOROWICZ (1983). Le Rift Est-africain: Début d'ouverture d'un océan. ? Soc.Nat.Elf Aquitaine.

CHOROWICZ, J., LE FOURNIER,J., LE MUT,C., RICHERT,J.P., SPY-ANDERSON,F.& TIERCELIN,J.J. (1983). Observation par télédétection et au sol de mouvements décrochants NW-SE dextres dans le secteur transformant Tanganyika-Rukwa-Malawi du rift Est-Africain. C.R.Acad.Sc. (Paris), 2., 296, 997-1002.

CHOROWICZ, J. & THOUIN, C. (1985). Failles synsédimentaires et structure de la plaine de la Rusizi (Nord - Tanganyika), C.R.Acad.sc.Paris, t.301(11) : 835-840.

CLAESSENS, W., FERNANDEZ-ALONSO, M., KLERKX, J., LIEGEOIS, J.-P., TACK. L. & THEUNISSEN, K. La mise en place des granites dans le kibarien du Burundi et du Rwanda. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1980, pp 127-129 (1981).

DASSARGUES, A. (1992) . Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains. Discrétisation du domaine, préparation statistique des données. Couplages et non-linéarités des paramètres, Thèse. Université de Liège, 313 pages.

DASSARGUES, A. (1995). Modélisation des réservoirs souterrains. Notes de cours. Université de Liège, 183 pages.

DEBLOND, A., (1994). Géologie et pétrologie des massifs basiques et ultrabasiques de la ceinture Kabanga-Musongati au Burundi. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.). Annales – Sciences géologiques – Vol. 99, pp 5-11

DEBLOND, A., PUNZALAN, L.E., BOVEN, A. & Tack, L.; (2001). The Malagarazi Supergroup of southeast Burundi and its correlative Bukoba Supergroup of northwest Tanzania: Neo- and Mesoproterozoic chronostratigraphic constraints from Ar-Ar ages on mafic intrusive rocks. Journal of earh Sciences, Vol.32, n°.3, pp. 435-449.

DEELSTRA, H., KATIHABWA, J. & WALEFFE, A. (1972). Les sources thermo-minérales au Burundi. Bull. Soc. Belge Et. Géogr., 41, pp 233 - 254.

Delhaye F et Salee A. (1928). Carte géologique au 1/200.000 du Ruanda-Urundi.

DELVAUX, D., (1991). The Karroo to recent rifting in the Western branch of the East-African rift system: A bibliographical synthesis. Mus. Roy. Afr. ,Tervuren (Belg.). Dépt. Géol. Min., Rapp. ann., 1989-1990 , pp 63-83.

DELVAUX, D., (2001). Tectonic and palaeostress evolution of Tanganyika – Rukwa – Malawi rift segment, East African Rift System. Mém. Mus. Nat. Hist., 186, pp 545-566.

DEMAIFFE, D. & THEUNISSEN, K. (1979). Données géochronologiques U – Pb et Rb-Sr relatives au complexe archéen de Kikuga (Burundi). Mus. Roy. Afr. ,Tervuren (Belg.). Dépt. Géol. Min., Rapp. ann., 1978 , pp 65 - 69.

DE MARSILY, G. (1981). Hydrogéologie quantitative. Editions Masson, Paris, 215 pages.

DE MARSILY , G. , (1992). Géostatistique en hydrologie, 60 pages.

De MULDER M. & THEUNISSEN K. (1980). Contribution à l'étude des métasédiments de la Haute –Kitenge. Mus. Roy. Afr. ,Tervuren (Belg.). Dépt. Géol. Min., Rapp. ann., 1979 , pp 185-205.
DE PAEPE, P. & FERNANDEZ-ALONSO, M. (1981). Contribution à la connaissance du volcanisme du Sud-Kivu : La région de Cyangugu-Bugarama, Mus. Roy. Afr. ,Tervuren (Belg.). Dépt. Géol. Min., Rapp. ann., 1980 , pp 111 - 116.

DHV Ingénieurs conseils (1979) : Etude de factibilité de l'Imbo centre. L'irrigation de l'Imbo par les eaux de la Kagunuzi. Ministère du Plan. République du Burundi.

FERNANDEZ-ALONSO, M., LAVREAU,J. & KLERKX,J. (1986). Geochemistry and geochronology of the Kibarian granites in Burundi, Central Africa: implications for the Kibaran orogeny. Chemical Geology, 57, pp 217-234.

FETTER, C. W. (1994) : Applied hydrogeology. Third edition .University of Wisconsin - Oshkosh, 691 pages.

FRANKART, R., SOTTIAUX, G. et NTORANYE, P.(1965). Projet de l'aménagement de l'Imbo . Plaine de la Rusizi . Pédologie et vocation des sols. ISABU et Centre d'études des sols tropicaux, UCL. Royaume du Burundi, 157 pages.

FRANKART& HERBILLON (1971). Aspects de la pédogenèse des sols halomorphes de la basse Rusizi (Burundi). Présence et génèse de l'analcime. Mus. Roy. Afr. ,Tervuren (Belg.). Annal 8, Sc. Géol. 71, 125 pages.

FRANSOLET, A.M. & TACK, L. (1990). La pegmatite lithique de Ndora. IGCP Project n° 255, Newsletter/Bulletin, 3, 27-29.

GERMAIN, R. (1955) : Note explicative de la carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda Urundi. Vallée de la Rusizi. Publication de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo Belge (I.NEAC). Bruxelles, 1960.

GOEMAERE, E., TACK, L., BUCUMI, A.,& THOREZ, J., (1993). Les vertisols topomorphes au Burundi : Apports des minéraux argileux. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1991-1992, pp 187 - 199.

GOURDIN, J., HOLLEBOSCH, P., & KIBIRITI, C., (1986). Etude chimique des eaux de la Rusizi et de ses affluents au Burundi. Publication ISABU, 63 pages.

HOEKSEMA, R & KITANIDIS, P (1985). Analysis of spatial structure of properties of selected aquifers. Water resources research, vol. 21, n°.4, pp 563-572.

HYDROPLAN (1993) : Régime des rivières venant de l'est de la basse plaine : Kajeke, Mpanda, Gifurwe, Musenyi, Muzazi et Gikoma.

ILUNGA L. K.(1984). Le quaternaire de la plaine de la Rusizi. Etude morphologique et lithostratigraphique. Thèse. Vrije Universiteit Brussel, 353 pages.

ILUNGA L. K.(1991). Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du Sud – Kivu. Bulletin de la société de Liège, 27, pp 209-228.

I.N.E.A.C (1955) : Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi. Vallée de la Ruzizi. Note explicative, 48 pages.
I.N.E.A.C (1960) : Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi. A - Sols. Bruxelles 1960, 83 pages.

JACQUEMIN, J.L. (1991). Contribution à l'étude minéralogique de la pegmatite de Ndora, Burundi. Université de liège, Mém.Lic.Sc.Géol.Min., 82 pages.

KANIKA, M., KAMPUNZU, A.B., CARON, J.P.H. & VELLUTINI, P.J., (1981). Données nouvelles sur le volcanisme de la haute Rusizi (Sud-Kivu, Zaïre).

KLERKX, J. et THEUNISSEN, K. (1977). Les principaux caractères lithologiques des formations métamorphiques antérieures au Malagarazien dans le Sud-Ouest du Burundi. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.) Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1976. pp. 95-100.

KLERKX J. & NANYARO J.T. 1988. The Ukinga Group in Southwestern Tanzania : a shear belt of Middle Proterozoic age ? IGCP Project n° 255 Newsletter, 1: pp 37-41.

KLERKX, J., LIEGEOIS, J-P., LAVREAU, J. & CLAESSENS, W. (1984). Granitoïdes kibariens précoces et tectonique tangentielle au Burundi ; magmatisme bimodal lié à une distension crustale. In : Géologie africaine-African geology, Tervuren pp 29-45.

KLERKX, J. (1985 a). Le Protérozoïque inférieur en Afrique orientale. In : Evolution géologique de l'Afrique, CIFEG, publication occasionnelle 1985/4, 85-90.

KLERKX, J. (1985 b). Le Protérozoïque moyen en Afrique orientale. In : Evolution géologique de l'Afrique, CIFEG, publication occasionnelle 1985/4, 85-90

KLERKX, J., LIEGEOIS, J-P., LAVREAU, J. & CLAESSENS, W. (1987). Crustal evolution of the Northern Kibaran belt in Eastern and Central Africa. In. Kröner, Geodynamics Series, American Geophysical Union, 17, pp 217-233.

LAHMEYER INTERNATIONAL (1983). Etude du développement des ressources hydroélectriques du Burundi. Données de base sur l'hydrologie, la pluviométrie et la climatologie.

LAVREAU, J. (1985). Le groupe de la Rusizi (Rusizien du Zaïre, Rwanda et Burundi) à la lumière des connaissances actuelles. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.) Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1983-1984, pp111 - 119.

LAVREAU , J. et al. (1991). Identification par télédétection de métallotectes lithologiques et structuraux dans le Sud-Est du Burundi. Mus. Roy. Afr. Cent., Tervuren (Belg.) Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1989-1990, pp105 - 118.
LEDENT, D. (1979). Résultats U/Pb et Rb/Sr obtenus sur des gneiss antérieures au Burundien au Rwanda et au Burundi. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.) Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1978. pp. 97-99.

LE FOURNIER, J., CHOROWICZ, J., THOUIN, C., BALZER, F., CHENET, J-P., MASSON, D., MONDEGUER, A., ROSENDAHL, B-R., SPY-ANDERSON, F-L & TIERCELIN, J-J., (1985). Le bassin du lac Tanganyika: évolution tectonique et sédimentaire. C.R. Acad. Sc. Paris, t.301, Série II, n° 14.

LIEGEOIS,J-P., THEUNISSEN, K., NZOJIBWAMI, E. & KERKX,J. (1982). Granitoïdes syncinématiques kibariens du Burundi : étude pétrographique, géochimique et géochronologique préliminaire. Ann. Soc. géol.Belg., 105, 345-356.

MEYER, A., (1954). Notes vulcanologiques. Congo Belge et Ruanda-Urundi. Mémoire N°2 -1953 . Service géologique. Bureau de Léopoldville et Bureau de Bukavu.

MONDEGUER, A., TIERCELIN, J-J., HOFFERT,M., LARQUE,P., LE FOURNIER,J., & TUCHOLKA,P. (1986). Sédimentation actuelle et récente dans un petit bassin en contexte extensif et décrochant : La baie de Burton, fossé Nord- Tanganyika, rift Est-Africain. Soc. Nat. Elf Aquitaine, pp 228 – 247.

MONDEGUER, A.,TIERCELIN, J-J & LE FOURNIER,J., (1987). Néotectonique et sédimentation associée : la terminaison Sud du fossé (Rift Est-africain. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 304, Série II, n° 8, pp 371-376.

MONJOIE, A., (1981) : Notes de cours d'Hydrogéologie, Université de Liège (Belgique), Faculté des sciences Appliquées, 130 pages.

MONJOIE, A., (1981). Mission hydrogéologique BU/811, République du Burundi, 27 pages.

NAHIMANA, L., (1988). Métamorphisme, tectonique et magmatisme dans une portion de la chaîne kibarienne du Nord-Ouest du Burundi. Thèse de doctorat inédite. Université Catholique de Louvain (Belgique).

NKURIKIYE, L., (1989). Le kaolin du Burundi : Contribution à sa caractérisation, sa genèse et son utilisation. Mém. Lic. Sc. Géol. Min., Université du Burundi. 84 pages.

NTAHONGANYIRA, R.M (1993). Contribution à l'étude des pegmatites de Ndora. Université du Burundi, Mém. Lic. Sc. Géol. Min., 59 pages

NTUNGICIMPAYE, A. (1981). Contribution à l'étude lithostratigraphique du Burundien inférieur dans la région de Mageyo (Burundi). Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.) Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1980. pp. 161 – 171.
NTUNGICIMPAYE, A. (1984). Contribution à l'étude du magmatisme basique dans le Kibarien de la partie occidentale du Burundi. Thèse de doctorat, Unversité de Gand (Belgique), 250 pages.

NZOJIBWAMI, E. (1983). La série migmatique de l'Ouest de Mugere (région de Bujumbura, Burundi). Abstracts, 12th Coll. Afr. Geol., Brussels, p.72.

NZOJIBWAMI, E.(1984). The West Mugere supracrustal complex (Bujumbura). Evidence of an ancient basement complex remobilized during the kibaran orogeny. UNESCO, Geology for Development, Newsletters3, 5-12.

NZOJIBWAMI, E. (1985). Le magmatisme basique dans le complexe migmatitique anté-kibarien de la région de Bujumbura (Ouest du Burundi). Abstract, 13th Coll. Afr. Geol. CIFEG, occasional puplication 1985 3, 38-39.

NZOJIBWAMI, E. (1987). Le précambrien cristallin de la région de Bujumbura (Burundi). Thèse. Université de Liège, 232 pages.

OPDECAMP, L. (1980). Etude pédologique du projet Rumonge. Première partie : étude morphogénétique. Publication ISABU, 61 pages.

OPDECAMP, L ; & SOTTIAUX (1987). Les kaolisols du Burundi et leurs difficultés de transposition dans les système internationaux de classification. Actes du dixième forum international sur la soil Taxonomy et les transferts d'agrotechnologie. A.G.C.D. Publications agricoles n° 10, pp 168 -172.

POUCLET, A. (1975). Histoire des grands lacs de l'Afrique centrale. Mise au point des connaissances actuelles. Revue de géographie physique et de géologie dynamique (2), Vol. XVII, Fasc. 5, pp. 475 – 482.

POUCLET, A. (1978). Les communications entre les grands lacs de l'Afrique centrale. Implications sur la structure du rift occidental. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1977, pp 145 - 155.

POUCLET, A. (1980). Les laves du Rift de l'Afrique Centrale. Revue des données pétographiques et chimiques. Essais de magmatologie. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1979, pp 81 - 128.

PRUVOT (1974) : Burundi. L'hydrologie d'Imbo. RDI/68/010, Document de travail. FAO, Rome 1974.

REEKMANS, M. (1975). Les problèmes de la conservation de la nature au Burundi. La végétation et ses phénophases dans un parc national en Projet : La plaine de la basse Rusizi. Thèse. Université de Liège, 306 pages.

REMENIERAS, G. (1965). L'hydrologie de l'ingénieur. Collection du centre de Recherches et d'essais de Chatou, 456 pages.
REYNES, P., ROLET, J., RICHERT, J-P., GRUNEISEN, P., PALENGAT, J-P & COQUELET, D., (1993). Apport des techniques 3D de la télédétection dans la recherche des blocs basculés du fossé Nord Tanganyika, Rift Est-Africain, Zaïre. Elf aquitaine production.

SAH S.C.D (1967). Palynology of an upper neogene profile from Ruzizi valley (Burundi). Ann. Mus. Roy. Afr. Centr. (Belgique), Vol. 57, 173 pages.

SHER S.A. (1987). Etude pour la mise en valeur de la région de l'Imbo Nord. Ministère du plan. République du Burundi.

SOGREAH Ingénierie (1991). Evaluation hydrologique de l'Afrique sub-saharienne, pays de la CEPGL, rapport de pays : Burundi.

SOGREAH Ingénierie (1993). Etude de préfaisabilité et de faisabilité des aménagements hydroélectriques de Kabu 16, Kabu 23, Masango et Rushiha. Volume 3 ;Etude hydrologique. Ministère de l'énergie et des mines. République du Burundi.

SOTTIAUX, G., OPDECAMP, L., BIGURA, C. & FRANKART, R. Carte des sols du Burundi. Note explicative. Institut des sciences agronomiques du Burundi. A.G.C.D. Publication du service agricole n°9.

SYS, C., (1960). Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi. Publication de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo Belge (I.NEAC). Bruxelles,1960.

TACK, L. & DE PAEPE, P. ; (1983). Le volcanisme du Sud Kivu dans le nord de la plaine de la Rusizi au Burundi et ses relations avec les formations géologiques avoisinantes. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1981-1982, pp 137-145.

TACK, L. (1984). Post-Kibaran intrusions in Burundi. UNESCO, Geology for Development, Newsletters 3, 47-57.

TACK, L. & DE PAEPE, P. ; (1987). Nouvelles observations géologiques dans le Nord de la plaine de la Rusizi au Burundi. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1985-1986, pp 149-155.

TACK, L., (1987). Evolution du rift occidental : un exemple de contrôle structural et de réactivation de linéaments taphrogéniques datant du Précambrien. Actes du dixième forum international sur la soil Taxonomy et les transferts d'agrotechnologie. A.G.C.D. Publications agricoles n° 10, pp 123-128.

TACK, L., & NKURIKIYE, L (1993). Caractérisation de deux sites particuliers de roches feldspathiques dans les environs de Bujumbura (Burundi). Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1991-1992, pp 183-186.

TACK, L. ; FERNANDEZ-ALONSO, M. ; TAHON, A. ; WINGATE, M. & BARRIT, S.; (2002). The "Northeastern Kibarian Belt" (NKB) and its mineralisations reconsidered: News constraints from a revised lithostratigraphy, a GIS-compilation of existing geological maps and a review of recently published as well as unpublished igneous emplacement ages in Burundi. 11th quadrennial IAGOD Symposium and Geocongress. Windhoek, Namibia.

TANGANYDRO (1992) : Les sites hydrothermaux sous-lacustres à sulfures massifs du fossé Nord-Tanganyika, Rift Est-africain : Expédition Tanganydro 1991. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 315, Série II, n° 8, pp 733-740.

TESSENS, E. (1989). Données climatologiques du Burundi : Précipitation, température, durée d'insolation. Institut des sciences agronomiques du Burundi (I.S.A.BU). Publication ISABU n° 134.

TESSENS, E. (1993). Etude pédologique de la région naturelle de l'Imbo. Institut des sciences agronomiques du Burundi (I.S.A.BU).Publication ISABU n° 169.

THEUNISSEN, K. & Klerkx, J. (1980). Considérations préliminaires sur l'évolution tectonique du « Burundien » au Burundi. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1979, pp 207 - 214.

THEUNISSEN, K. (1989). On the Rusizian basement rise in the Kibara belt of the Northern lake Tanganyika. Collision belt geometry of restraining bend emplaced in the late Kibaran strike-slip environment. IGCP 255. Newletter/Bulletin1, pp 55-64.

TIERCELIN, J-J., SCHOLZ, C-A., MONDEGUER, A., ROSENDAHL, B-R., & RAVENNE, C. (1989). Discontinuités sismiques et sédimentaires dans la série de remplissage du fossé du Tanganyika, Rift Est-africain. C.R. Acad. Paris, t.309, Série II, pp 1599-1606.

TIERCELIN, J-J., SOREGHAN, M., COHEN, A-S., LEZZAR, K-E,; & BOUROULLEC, J-L (1992). Sedimentation in large rift lakes. Examples from the middle Pleistocene – modern deposits of the Tanganyika trough, East African Rift system. Elf aquitaine production, pp 83-111.

VAN WAMBEKE, A (1963). Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi, Bruxelles, I.N.E.A.C, 67 pages.
Villeuneuve, M. (1978). Les centres d'émissions volcaniques du Rift Africian au Sud du lac Kivu (République du Zaïre). Revue de géographie physique et de géologie dynamique (2), Vol. XX, Fasc.4, pp 323-334, Paris.

WALEFFE, A. (1965). Etude géologique de l'Est du Burundi (régions du Mosso et de Nkoma). Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.). Sér. in 8, sc. Géol. 43 .

WALEFFE, A. (1966). Etude géologique de l'Est du Burundi et stratigraphie du Burundien. Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1965, pp 69-74.

WALEFFE, A. (1985). Esquisse hydrogéologique de la plaine de la Basse Rusizi (Burundi). Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1983-1984, pp 177-187.

WALEFFE, A. (1989). Quelques données géologiques et hydrogéologiques inédites sur la partie septentrionale de la plaine de la Rusizi (Burundi). Mus. Roy. Afr.centr., Tervuren (Belg.), Dépt. Géol. Min., Rapp. ann. 1987-1988, pp 139 -148.

YZQUIERDO, J.L.; (1960). Levé gravimétrique de la plaine de la Rusizi. Rapp. ann. serv.géol. Ruanda – Urundi, Vol.1, pp 31-37