



National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service    Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

## NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

## AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.



National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service    Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-53292-0

IMPACT DE L'AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE DES  
TOURBIERES DU RUGEZI SUR LE POTENTIEL HYDRO-ELECTRIQUE  
DE LA RIVIERE MUKUNGWA, RWANDA

Par  
Gaëtan Thibault

Thèse  
Soumise sous la supervision du  
Dr. Eric J. Schiller

En vue de l'obtention de la  
Maîtrise ès Sciences Appliquées  
en  
Génie Civil

Département de Génie Civil  
Université d'Ottawa  
Ottawa, Canada  
KLN 6N5



Gaetan G. Thibault, Ottawa, Canada, 1989

**Cette thèse est dédiée à  
Suzanne, Geneviève et Olivier**

## REMERCIEMENTS

Une appréciation spéciale est adressée à l'égard des Profs. B. Baudin, E.J. Schiller et P. Wisner pour leurs commentaires respectifs sur la géologie, le drainage et l'hydrologie traités dans le document.

L'auteur tient également à remercier le Dr. Alton Byers, géomorphologue, Mme. E. Byers, hydrologue et M. V. Nyamulinda, géographe, tous trois du projet RRAM, pour leur support technique et logistique lors l'acquisition des données au Rwanda.

Une appréciation toute particulière va également aux autorités rwandaises dont son excellence M. Joseph Nsengiyumva, ambassadeur du Rwanda au Canada et M. Protais Zigiranyirazo préfet de Ruhengeri de même qu'aux représentants du Canada au Rwanda, soit Mme. Johanne Goulet et M. Howard Stewart, premiers secrétaires et vice-consuls.

Finalement l'auteur remercie tout particulièrement M. Ismail Najjar d'Hydrosult Inc. pour ses précieux conseils en hydrogéologie et Mme. Susen Borau pour la dactylographie.

Cette recherche a pu être réalisée grâce à une bourse offerte par l'Agence Canadienne de Développement International dans la cadre de son programme d'aide aux canadiens oeuvrant en coopération internationale.

## ABSTRACT

L'étude qui suit vise à établir un bilan hydrique annuel à partir duquel il est possible d'une part, de connaître le volume d'eau perdu par évapotranspiration dans la partie non-aménagée des tourbières, et d'autre part, de mesurer l'importance relative de ces tourbières dans l'ensemble hydro-électrique de la rivière Mukungwa au Rwanda.

Partant de données mensuelles de précipitations et de ruissellement s'étalant de 1961 à 1986, l'étude a permis de démontrer que pour un bassin versant de 148 km<sup>2</sup>, dont 54 km<sup>2</sup> en tourbières, situé en zone sub-équatoriale à une altitude variant entre 2 050 et 2 504 mètres, les pertes annuelles en eau dues à l'évapotranspiration s'élèvent à 80% du volume annuel des précipitations, soit 980 mm/an pour une précipitation annuelle moyenne de 1 215 mm/an. La géologie particulière de la région montre que les pertes par infiltration profonde sont d'autre part négligeables.

L'analyse permet également de constater qu'en termes d'évapotranspiration, la tourbière non-aménagée se comporte comme une culture continuellement irriguée. Par discrétisation du bassin versant et en appliquant la méthode de Penman modifiée, on trouve un coefficient cultural égal à 1,0 sur la base d'un bilan hydrique annuel.

Ces constatations permettent de conclure qu'un développement hydro-agricole des tourbières de Rugezi, caractérisé par un drainage peu profond (0,60 à 1,00 mètre) et une exploitation rationnelle des cultures, aura un impact positif sur le potentiel hydro-électrique de la rivière Mukungwa en augmentant la production nominale de plus de 17 GWh. D'autre part, le drainage des tourbières augmentera de 65% les débits mensuels moyens en période de crues, ce qui réduira de 0,5 GWh le potentiel énergétique moyen de la future centrale de Rugezi.

L'étude montre finalement que le développement hydro-agricole des marais

iii.

Rugezi et Kamiranzovu doit se faire conjointement avec le développement hydro-électrique de la chute Rugezi (170 mètres), ce qui permettra à la fois de tirer le maximum du potentiel hydro-électrique du site Rugezi et assurera un apport constant en eau aux cultures.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
Remerciements	i.
Abstract	ii.
Table des matières	iii.
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Glossaire	
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.1.1 L'énergie	1
1.1.2 L'agriculture	1
1.1.3 L'exploitation des Marais Rugezi - Kamiranzovu	3
1.1.4 Les problèmes de gestion des ressources en eau	6
1.1.5 Avertissement relatif à l'impact environnemental du développement des marais Rugezi	7
1.2 Informations de base	8
1.2.1 Données hydrologiques	8
1.2.2 Données climatologiques	9
1.2.3 Données physiques	10
1.3 Revue de la littérature - Evapotranspiration	11
1.3.1 Evaporation des marais	11
1.3.2 Evaporation des tourbières	12
1.3.3 Evapotranspiration potentielle et de surface	13
1.3.4 Evapotranspiration en milieu montagneux	14
1.4 Méthodologie	15
2.0 LE RWANDA	18
2.1 Situation géographique	18
2.2 Situation économique	20
2.3 Fiche technique	21
2.4 Développement agricole	22
2.4.1 Contraintes	23
2.4.2 Perspectives	25
2.5 Développement énergétique	26
2.5.1 Les ressources énergétiques	26
2.5.2 Les ressources hydro-électriques	27
2.5.3 Demande en électricité	28
2.5.4 Perspectives du secteur de l'énergie hydraulique	30

	<u>PAGE</u>	
3.0	BASSIN DE LA RIVIERE MUKUNGWA	31
3.1	La géologie et les sols du bassin Mukungwa	31
3.1.1	Géologie	31
3.1.2	Les sols	35
3.2	Réseau hydrographique de la Mukungwa	39
3.2.1	Paléo-drainage	39
3.2.2	Réseau hydrographique actuel	41
4.0	HYDROMETEOROLOGIE	52
4.1	Climatologie de la zone d'étude	52
4.2	Précipitations	56
4.2.1	Réseau pluviométrique	56
4.2.2	Analyse des données de précipitation	58
4.2.2.1	Estimation des données manquantes	58
4.2.3	Validité des données	69
4.2.4	Préparation de la carte des isohyètes	72
4.2.5	Précipitations annuelles moyennes	76
4.3	Evaporation et évapotranspiration	77
4.3.1	Sélection d'une méthode d'estimation	77
4.3.1.1	Bilan hydrique	77
4.3.1.2	Bilan énergétique	78
5.0	GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	84
5.1	Région du socle précambrien	84
5.2	Région des laves	84
6.0	RUISSELLEMENT ET LIMNOLOGIE	84
6.1	Méthodes et mesures	91
6.1.1	Débits en rivière	91
6.1.2	Niveau des lacs et volume de stockage	98
6.1.3	Volumes annuels turbinés	103
6.1.3.1	Centrale de Ntaruka	103
6.1.3.2	Centrale de Mukungwa I	106
6.1.4	Volumes déversés aux trop-pleins des barrages	107
6.2	Compilation des volumes	107
6.3	Commentaires sur les volumes de chaque sous-bassin	110
7.0	BILAN HYDRIQUE DU SOUS-BASSIN RUGEZI	112
7.1	Validation du bilan hydrique	114
7.1.1	Méthode du bac	114
7.1.2	Méthode Penman modifiée	119
7.1.3	Calcul de l'évapotranspiration réelle	123

	<u>PAGE</u>	
7.2	Equation détaillée du bilan du sous-bassin Rugezi	129
7.3	Variations mensuelles de l'évapotranspiration des tourbières	131
8.0	IMPACT DE L'UTILISATION HYDRO-AGRICOLE DES MARAIS SUR LE POTENTIEL HYDRO-ELECTRIQUE DE LA MUKUNGWA	134
8.1	Impact de la fermeture de l'exutoire Fels sur le potentiel hydro-électrique du bassin de la Mukungwa	136
8.2	Impact dû à l'utilisation agricole des tourbières	139
8.2.1	Superficie aménageable	141
8.2.2	Effets dus au changement d'occupation des sols	142
8.3	Impact du drainage	143
8.3.1	Tassement des tourbières	143
8.3.2	Diminution du temps de réponse du bassin	144
8.3.3	Mesures d'atténuation: érosion et tassement des tourbes	149
9.0	CONCLUSIONS	151
10.0	RECOMMANDATIONS	154
ANNEXE A: Données brutes de précipitation		
ANNEXE B: Courbes cumulatives des précipitations		
ANNEXE C: Mesures de débits		
ANNEXE D: Calculs hydrauliques - centrale de Ntaruka		
ANNEXE E: Occupation des sols - sous-bassin Rugezi		
ANNEXE F: Tableau pédologique des marais		
ANNEXE G: Plan de mise en valeur agricole-équipement proposé		
ANNEXE H. Calcul préliminaire du potentiel hydro-électrique du site Rugezi/Rusumo		

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABEAU</u>		<u>PAGE</u>
1.1	Offre et demande d'énergie au Rwanda	2
2.1	Prévision des besoins en énergie	29
3.1	Caractéristiques des bassins versants: sous-bassin Rugezi	45
3.2	Caractéristiques des bassins versants: sous-bassin Lac Bulera	47
3.3	Caractéristiques des bassins versants: sous-bassin Lac Ruhondo	48
3.4	Caractéristiques des bassins versants: sous-bassin Mukungwa II	50
4.1	Balance de la chaleur à la surface du globe	53
4.2	Répartition des stations pluviométriques par tranche d'altitude	57
4.3	Précipitation annuelle avant calcul des valeurs manquantes	59
4.4	Matrice de corrélation - Préc. annuelle 1959 à 1986	61
4.5	Matrice de corrélation - Préc. annuelle 1959 à 1986	61
4.6	Estimation des valeurs manquantes par Rég. Multiple	64
4.7	Corrélation des précipitations annuelles 1945 à 1975	66
4.8	Corrélation des précipitations annuelles 1965 à 1975	67
4.9	Corrélation des précipitations annuelles 1970 à 1978	68
4.10	Corrélation des précipitation annuelles 1978 à 1986	69
4.11	Précipitation annuelle: après calcul des valeurs manquantes	70
4.12	Consistance des données de précipitation (1970 - 1986)	71
4.12a	Consistance des données de précipitation (1979 - 1986)	71
4.13	Données de base pour la carte des isohyètes	73
6.1	Relation hauteur-débit: station Rugezi	96
6.2	Relation hauteur-débit: station Rwaza	97
6.3a	Débits mensuels corrigés: Rugezi	101
6.3b	Débits mensuels corrigés: Rwaza	102
6.4	Courbe volumétrique: Lac Bulera	104
6.5	Courbe volumétrique: Lac Ruhondo	105
6.6	Volumes sortant ou emmagasinés au Lac Bulera	108

<u>TABLEAU</u>		<u>PAGE</u>
6.7	Volumes sortant ou emmagasinés au Lac Ruhondo	109
7.1	Valeurs des coefficients du bac d'évaporation	116
7.2	Evaporation potentielle à partir du bac de Ruhengeri	118
7.3	Evapotranspiration potentielle - Penman modifiée St. Ruhengeri	122
7.3a	Evapotranspiration potentielle - Penman modifiée St. Rwerere-Col.	122
7.4	Coefficients culturels saisonniers: versants cultivés	126
7.5	Coefficients culturels saisonniers: marais cultivés	126
7.6	Evapotranspiration maximale en milieu humide	130
8.1	Impact de la Fermeture Fels sur le potentiel hydro-électrique de la Mukungwa	138
8.2	Bénéfices imputables à la fermeture de l'exutoire Fels	138
8.3	Caractéristiques futures du sous-bassin Rugezi	142
8.4	Impact de l'exploitation agricole sur le potentiel hydro-électrique	150
8.5	Bénéfices imputables au développement hydro-agricole	150

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE</u>		<u>PAGE</u>
1.1	L'électricité au Rwanda	2
1.2	Le bassin versant Haute-Mukungwa	4
1.3	Niveau du lac Bulera et production hydro- électrique	5
2.1	République Rwandaise	19
3.1	Site de l'étude	32
3.1a	Carte hydrographique - Rivière Mukungwa	33
3.1b	Profil schématique des surfaces hydrologiques	34
3.2	Lithographie de la préfecture de Ruhengeri	36
3.2a	Topographie de la préfecture de Ruhengeri	38
3.3	Paléo-drainage	40
3.3a	Schéma du drainage actuel	40
3.4	Organisation du drainage dans le sous-bassin Est	42
3.5	Bassin versant du complexe Rugezi	44
4.1	Zones climatiques de la terre	55
4.2	Types de variation des précipitations annuelles	55
4.4	Carte des isohyètes	75
5.1	Géologie	85
5.2	Coupes géologiques	86
5.5	Zone de Cyanika	89
6.1	Courbe hauteur-débit: station Rugezi	94
6.2	Courbe hauteur-débit: station Rwaza	95
6.3	Superficie vs Elevation: Lac Ruhondo	99
6.4	Superficie vs Elevation: Lac Bulera	100
6.5	Schéma du bassin versant de la haute Mukungwa	111
7.1	Coupe géologique du sous-bassin Rugezi	113
7.2	Modèle de calcul de la méthode de Penman	121
7.3	Sous-bassin Rugezi - Utilisation des sols	124
7.4	Evapotranspiration des tourbières - variations mensuelles	133
8.1	Découpage du sous-bassin Rugezi	135
8.2	Courbes caractéristiques de dessèchement des tourbes oligotrophes	140
8.3	Profil des tourbières du Rugezi	140
8.4	Répartition mensuelle en % de la pluviométrie et de l'écoulement	145
8.5a	Hydrogramme annuel-Rugezi: débit moyen	147
8.5b	Hydrogramme annuel-Rugezi: débit maximum	147
8.6a	Débits classés: sans Fels et sans développe- ment agricole	148
8.6b	Débits classés: avec développement hydro- agricole	148

GLOSSAIRE

SYMBOLES:

$A_m$	Superficie des marais non cultivés, [ha]
$A_{mc}$	Superficie des marais cultivés, [ha]
$A_v$	Superficie des versants des marais, [ha]
$A_t$	Superficie totale du sous-bassin Rugezi, [ha]
$b$	Largeur de la section de contrôle de débit, [m]
$C_w$	Coefficient de contraction des déversoirs
$d$	Profondeur d'eau à la section de contrôle, [m]
$E_a$	Différence entre pression de vapeur saturée et tension de vapeur mesurée, [mmbar]
$e_a$	Pression de vapeur de l'air, [mmbar]
$E_{bac}$	Evaporation du bac, [mm]
$E_i$	Evaporation, [cm/jr]
$e_o$	Pression de vapeur à la température de l'eau, [mmbar]
$E_p$	Energie produite, [kwh]
$E_T$	Evapotranspiration, [mm]
$ETP$	Evapotranspiration potentielle, [mm]
$ETR$	Evapotranspiration réelle, [mm]
$ETR_m$	Evapotranspiration réelle des marais non cultivés, [mm]
$ETR_{mc}$	Evapotranspiration réelle des marais cultivés, [mm]
$ETR_v$	Evapotranspiration réelle des versants, [mm]
$EV$	Evaporation moyenne, [mm]
$F_o$	Redistribution de la chaleur par les courants marins, [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
$h$	Hauteur limnimétrique, [m]
$h_e$	Hauteur de charge sur le déversoir, [m]
$H_{eff}$	Hauteur de chute effective (turbines), [m]
$H_t$	Hauteur de chute totale (turbines), [m]
$I$	Infiltration profonde, [mm]
$K$	Coefficient de perméabilité, [cm/sec]
$K_{bac}$	Coefficient du bac
$K_c$	Coefficient cultural (Penman)
$L_e$	Largeur effective du seuil de déversoir, [m]
$L_r$	Apport en chaleur provenant de la condensation dans l'atmosphère, [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
$N$	Coefficient aérodynamique (Penman)
$n$	Nombre d'observation (Statistique)
$N_i$	Précipitation normale à long terme de la station $i$ , [mm]
$N_j$	Nombre d'observations pour la $j^{i\text{ème}}$ variable indépendante (statistique)

GLOSSAIRESYMBOLES:

P	Précipitation annuelle moyenne, [mm]
$P_i$	Précipitation annuelle à la station i, [mm]
$P_x$	Précipitation manquante, [mm]
Q	Débit total, [m <sup>3</sup> /sec]
q	Débit unitaire, [m <sup>3</sup> /sec]
$Q_r$	Débit total établi par régression, [m <sup>3</sup> /sec]
R	Balance de radiation, [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
$R_a$	Balance de radiation de l'atmosphère, [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
$R_n$	Radiation nette (Penman), [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
$R_r$	Ruissellement moyen à Rugezi, [mm]
$\underline{R}$	Matrice de corrélation des variables indépendantes
S	Stockage, [mm]
$S_j$	Ecart-type de la j <sup>ième</sup> variable indépendante
T	Transfert de chaleur de la surface vers l'atmosphère, [kcal/cm <sup>2</sup> /an]
v	Vitesse du vent (Penman), [m/sec]
$V_i$	Vitesse à mi-hauteur de la section de contrôle, [m/sec]
$V_T$	Volume d'eau turbiné, [m <sup>3</sup> ]
$X_j$	Moyenne de la j <sup>ième</sup> variable indépendante
$\underline{Z}$	Matrice de $[(X_{i,j} - X_j)/S_j]$
$\underline{Z}'$	Matrice transposée de $\underline{Z}$
$\Delta$	Pente de la courbe de pression de vapeur saturée à la température de l'air
$\gamma$	Constante de l'équation psychrométrique

GLOSSAIREAbréviations et acronymes

BUNEP	Bureau National d'Etudes de Projets au Rwanda
Electro-gaz	Société d'Etat rwandaise responsable pour le Minitrape de l'électricité et de l'alimentation en eau potable des villes
EPRI	Electric Power Research Institute
FAO	Fond d'Aide alimentaire des Nations Unies Franc Rwandais (58 FRW/\$ CAN)
GBK	Projet Gisenyi, Butare, Kigali (Banque Mondiale)
ISAR	Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda
ITZC	Zone Intertropicale de Convergence des Vents Alizés
MINAGRI	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage du Rwanda
MINITRAPE	Ministère des Travaux Publics et de l'Energie du Rwanda
OMM	Organisation Mondiale de Météorologie
PIB	Produit Intérieur Brut
PNB	Produit National Brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
RRAM	Ruhengeri Resource Analysis and Management Project
RTM	Rapports Techniques mensuels des centrales hydro-électriques
SCS	Soil Conservation Services, U.S. dept. of agriculture

## **1.0 - INTRODUCTION**

### **1.1 Problématique**

#### **1.1.1 L'énergie**

Le potentiel hydro-électrique du bassin de la rivière Mukungwa située au Rwanda totalise 95,3 GWh, soit un peu moins du tiers du potentiel hydro-électrique disponible pour l'ensemble du Rwanda.

Ce potentiel est déjà exploité à plus de 70% grâce aux deux centrales de Ntaruka (22 GWh) et de Mukungwa I (45 GWh), et l'on prévoit entreprendre bientôt la construction de la centrale Mukungwa II (16 GWh). On étudie également la possibilité d'exploiter le site de Rusumo/Rugezi (12,3 GWh).

Malgré cela, la demande d'énergie au Rwanda est telle qu'il faut compter sur des importations du Zaïre pour combler le déficit de production (voir tableau 1.1). Dans un tel contexte il importe donc de planifier l'utilisation des ressources en eau de la rivière Mukungwa de façon à optimiser son potentiel énergétique.

#### **1.1.2 L'agriculture**

Le Rwanda est un pays essentiellement agricole et 95% de sa population est rurale. Bien que ce pays soit le plus densément peuplé d'Afrique, il réussit jusqu'à présent à assurer son autosuffisance alimentaire. Cette situation est sérieusement compromise cependant par l'accroissement rapide de sa population (3 à 4% par année).

Mis à part les programmes de contrôle des naissances et d'amélioration de la production agricole, des efforts de plus en plus grands sont faits vers l'exploitation agricole de toutes les superficies disponibles sur le territoire.

FIG.1.1: L'ELECTRICITE AU RWANDA  
OFFRE ET DEMANDE 1986 @ 2000

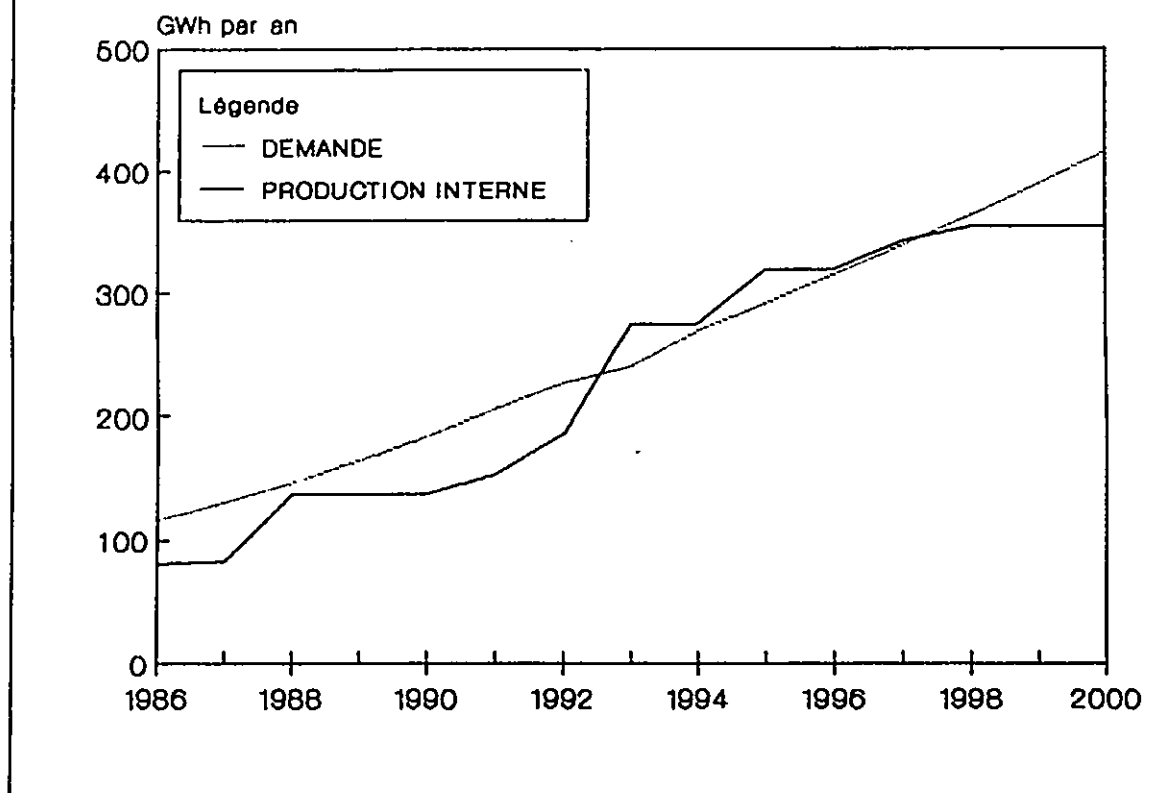


TABLEAU 1.1: OFFRE ET DEMANDE D'ENERGIE AU RWANDA (GWh)

ANNEES	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
<b>PRODUCTION INTERNE</b>															
-NTARUKA (22GWh)	20	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
-MUKUNGA I (45 GWh)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
-MUKUNGA II (16 GWh)						16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
-RUSUMO/RUGBTI													12	12	12
<b>SOUS-TOTAL, MUKUNGA</b>	<b>65</b>	<b>67</b>	<b>67</b>	<b>67</b>	<b>67</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>95</b>	<b>95</b>	<b>95</b>
-GIHIRA (10GWh)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
-GISENYI (5.5GWh)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
-RUZIZI II (55GWh)			55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
-MUKABARA (32.5GWh)						33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
-RUSUMO/O.B.K. (270GWh)							90	90	90	90	90	90	90	90	90
-NYADARONGO									44	44	44	44	44	44	44
-BASE												12	12	12	12
-AKANYARU II												11	11	11	11
<b>PRODUCTION TOTALE</b>	<b>81</b>	<b>83</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>154</b>	<b>186</b>	<b>276</b>	<b>276</b>	<b>320</b>	<b>320</b>	<b>343</b>	<b>355</b>	<b>355</b>	<b>355</b>
<b>PART DE MUKUNGA EN %</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>49</b>	<b>49</b>	<b>49</b>	<b>54</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>
<b>DEMANDE EN ENERGIE</b>	<b>116</b>	<b>131</b>	<b>147</b>	<b>164</b>	<b>184</b>	<b>205</b>	<b>226</b>	<b>240</b>	<b>270</b>	<b>292</b>	<b>315</b>	<b>339</b>	<b>364</b>	<b>389</b>	<b>416</b>

Source: Motor-Columbus/Oskar Von Miller, 1987.

### 1.1.3 L'exploitation des Marais Rugezi - Kamiranzovu

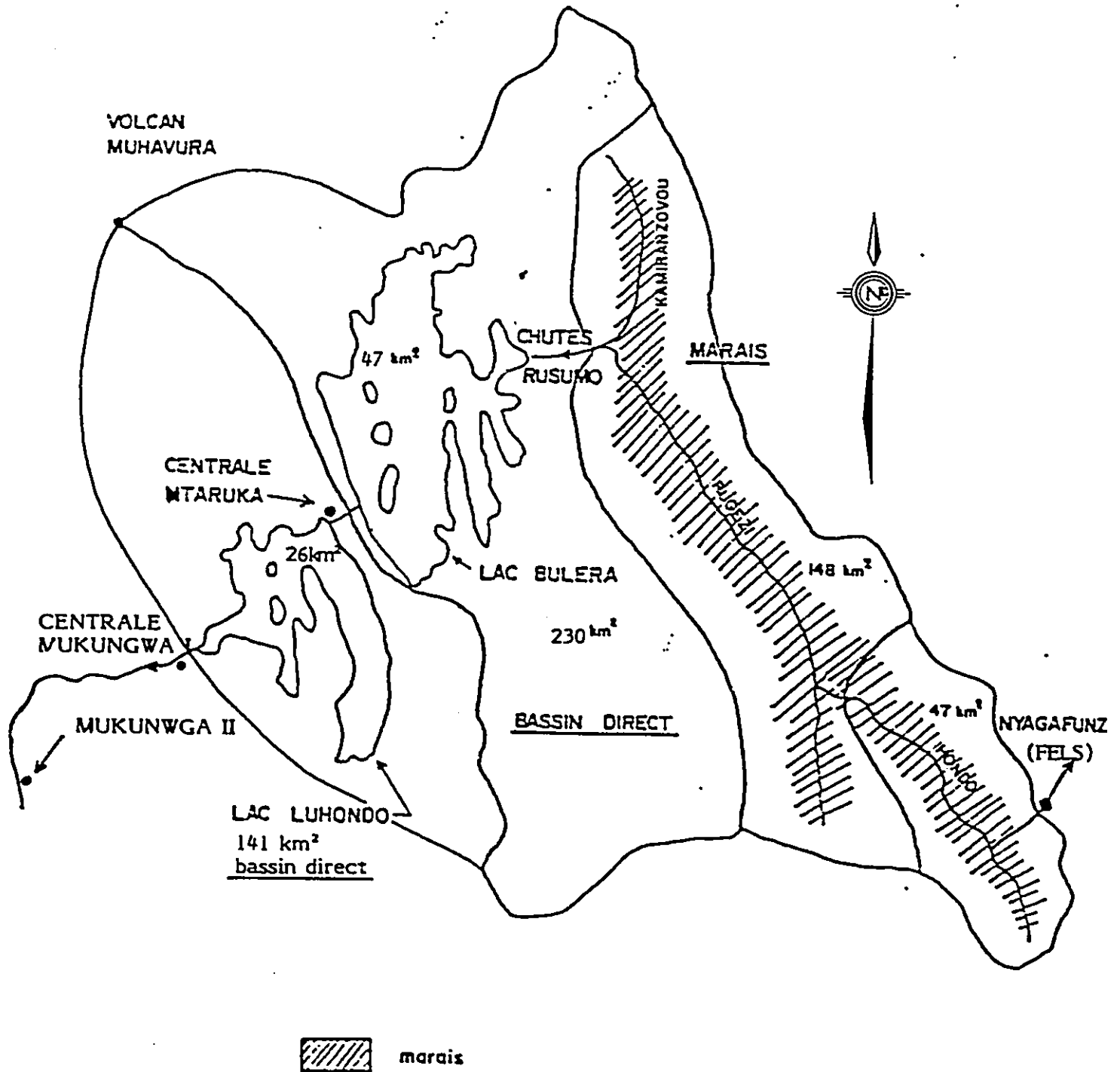
Vaste vallée noyée couvrant plus de 7000 ha, les marais de Rugezi et Kamiranzovu ont depuis longtemps attiré l'attention des développeurs.

D'abord convoités pour leurs réserves de tourbe estimées à plus de 500 millions de mètres cubes (Deuse, 1966), ces marais ont depuis fait l'objet d'études exhaustives visant leur utilisation hydro-agricole et le développement de cultures industrielles telles le thé et les cultures maraichères. La réalisation de ce projet passe évidemment par du drainage à plus ou moins grande échelle, modifiant ainsi les caractéristiques hydrologiques à l'aval des marais, et influant sur le potentiel hydro-électrique de l'ensemble du complexe de la rivière Mukungwa. Dès le début de la colonisation (1930-40), une brèche fut pratiquée dans la colline à Nyagafunzo afin de permettre la culture de pommes de terre, de géranium et de thé. Ainsi les eaux d'une partie du marais qui autrefois se déversaient vers la rivière Mukungwa furent déviées vers la rivière Mulindi. Cette dérivation s'appelle la dérivation Fels.

Un expérience pilote de drainage hydro-agricole a ensuite été entreprise au début des années 70 sur une partie du marais: la dérivation Fels à Nyagafunzo (fig. 1.2) fut approfondie, soustrayant ainsi 47 km<sup>2</sup> au bassin naturel de la Mukungwa. Or, à la même époque, on a constaté une baisse marquée du niveau du Lac Bulera qui sert de réservoir pour la centrale hydro-électrique de Ntaruka. Il n'en fallut pas plus pour stopper le projet-pilote de développement des marais. On a par la suite constaté que la baisse marquée du lac entre les années 70 et 78 était attribuable surtout à un turbinage excessif des eaux du lac Bulera à la centrale Ntaruka (voir figure 1.3), et non pas seulement au drainage des marais vers la dérivation Fels.

FIGURE 1.2

LE BASSIN VERSANT HAUTE-MUKUNGWA



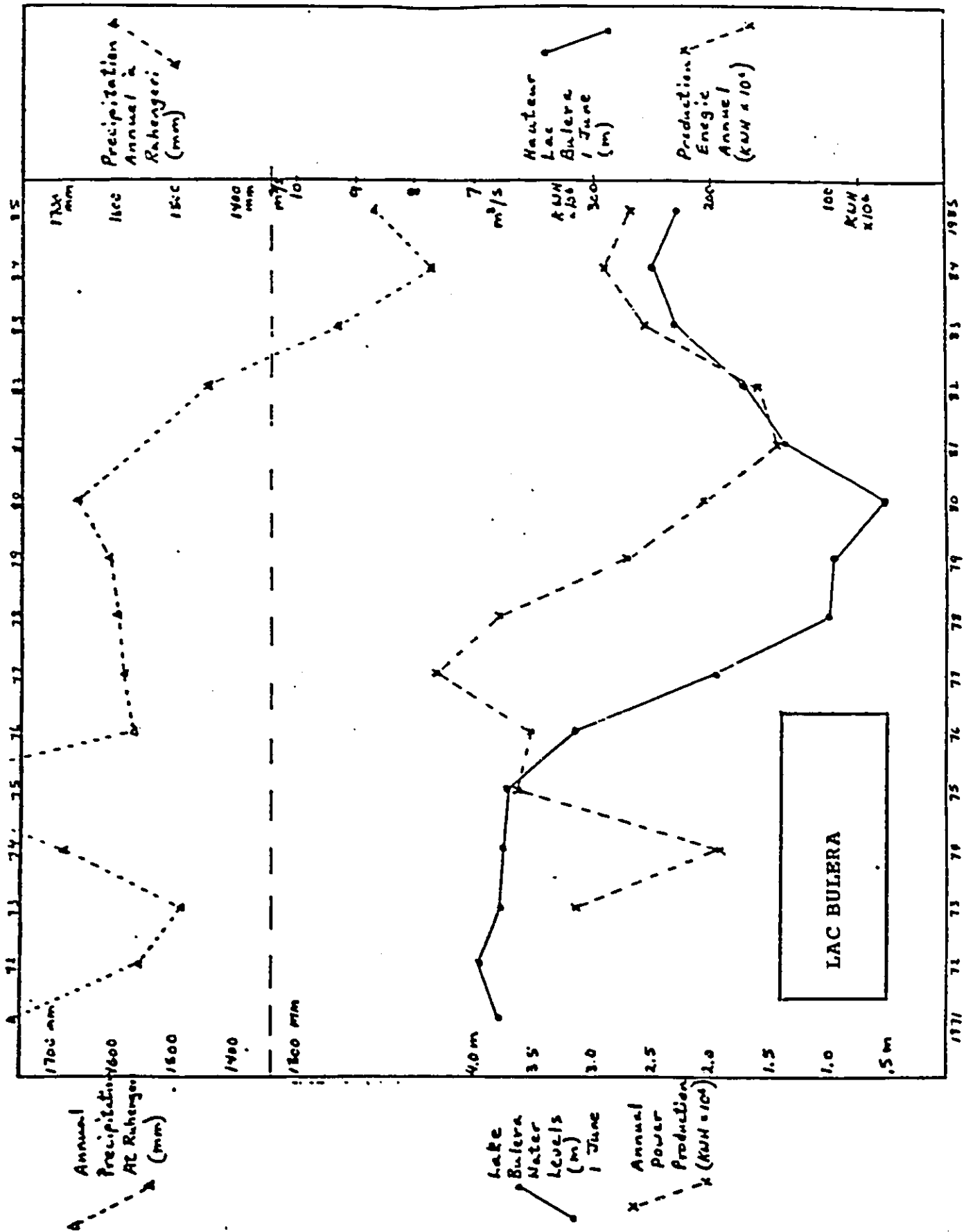


Figure I.3 : Niveau du lac Bulera et production hydro-électrique

Source: Wash Field Report No. 181. RRAM 1986.

#### **1.1.4 Les problèmes de gestion des ressources en eau**

On se retrouve donc devant un problème de conflit d'utilisation des ressources en eau du bassin de la rivière Mukungwa où, d'une part le Minitrape, par le biais de l'Electro-gaz, veut utiliser tout le potentiel hydro-électrique du bassin de la rivière Mukungwa afin de répondre à une demande en énergie sans cesse grandissante au pays.

D'autre part, le Minagri cherche à développer l'utilisation des marais afin d'accroître la production agricole du pays. Dans un tel contexte, le drainage et l'exploitation hydro-agricole des marais de Rugezi et Kamiranzovu offrent des intérêts certains. Par contre, la situation énergétique fragile du Rwanda exige tout d'abord que l'on réponde à un certain nombre d'interrogations, dont:

- a) Quelle est l'influence des marais sur le régime hydrologique alimentant les centrales existantes de Ntaruka et Mukungwa I, et les futures centrales de Rugezi et Mukungwa II?**
- b) Dans quelle mesure l'aménagement hydro-agricole des marais modifiera-t-il ce régime hydrologique?**
- c) Dans le cas d'un impact négatif de ces aménagements sur le potentiel hydro-électrique du bassin de la Mukungwa, quelles sont les mesures de mitigation à envisager?**

Le présent document tente donc de répondre à ces questions.

**1.1.5 Avertissement relatif à l'impact environnemental du développement des marais Rugezi**

L'étude qui suit n'est pas une évaluation de l'impact environnemental lié au développement hydro-agricole des marais du Rugezi. Les quelques points d'ordre environnemental qui seront soulevés plus loin ne se veulent qu'une mise en garde contre certains effets potentiellement nocifs du développement des marais.

Notons seulement que la dimension du marais Rugezi (7 000 ha.), sa complexité en terme de flore (tourbière), sa localisation critique par rapport à la micro-climatologie de la région de Ruhengeri et finalement son influence sur les populations avoisinantes justifient amplement une évaluation détaillée de l'impact environnemental préalable à toute décision de développement des marais Rugezi, que ce soit à des fins agricoles ou autres.

## 1.2 Informations de base

Pour répondre aux questions posées plus haut, nous avons en main un certain nombre de données de base qui se résument ainsi:

### 1.2.1 Données hydrologiques

#### Débits mensuels

Station	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Rugezi/Rusumo	1957 - 70	1961-63/65 67/70	-
Rwaza	1966 - 86	1966, 73/82/75	1974

#### Débits mensuels turbinés

Centrale	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Ntaruka*	1974 - 87		
Mukungwa	1982 - 87	1982	

\* Production trimestrielle disponible [1960-1974]

#### Débits journaliers

Station	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Rugezi	1971 - 87		
Rwaza	1971 - 86	73 / 75 / 82	1974

#### Débits journaliers turbinés

Centrale	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Ntaruka	1983 - 85	83	

Niveaux mensuels des lacs

Station	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Lac Bulera	1955 - 87	87	
Lac Ruhondo	1955 - 87	82 / 87	73 / 74 / 81

Niveaux Journaliers des lacs

Station	Période	Années de lacunes	Années manquantes
Lac Bulera	1955 - 87	87	
Lac Ruhondo	1955 - 87	82 / 87	73 / 74 / 81

**1.2.2 Données climatologiques**

Données brutes

Stations	P.Mensuelle	Nbre de jours de pluie	Max en 24 hre.	Evap. Piche	Evap. Bac	Bassin Versant
Rwerere-Marais	1959-87	1959-87	1959-87	63-87	-	Rugezi
Rwerere-Colline	1961-67/69-87	61-67/69-87	61-67/69-87	63-85	-	Rugezi
Kinoni	1965-86	1965-86	65-86	-	-	Bulera
Kinigi	44-75, 82-86	44-75, 82-86	44-75, 82-86	86	-	Mukungwa
Karisoke	79-85	79-85	79-85	-	-	Mukungwa
Ruhunde	54-74/76-86	54-74/76-86	54-74/76-86	-	-	Rugezi
Ruhengeri-Préf.	1928-86	28-86	28-86	-	-	Mukungwa
Ruhengeri-Aero	1978-87	78-87	78-87	77-87	78-87	Mukungwa
Mukingo	1965-86	65-86	65-86	-	-	Mukungwa
Musanze	1982-86	82-86	82-86	-	-	Mukungwa
Nyakinama	1983-86	83-86	83-86	-	-	Mukungwa
Ntaruka	1971-86	-	-	-	-	Ruhondo

Données réduites - Moyennes mensuelles (autres que les précédentes)

Station	Nombre d'années d'observation	Bassin Versant
Bulera-Lac	1970 - 1985	Bulera
Rwaza	1926-57 / 65-85	Ruhondo

**1.2.3 Données physiques**

- Cartes topographiques : 1:50000
- Cartes d'occupation des sols : 1:20000
- Carte géologique : 1:100000
- Etude pédologique des marais
- Besoins énergétiques futurs du Rwanda (an 2000)
- Description des centrales existantes
- Avant projet de la centrale Mukungwa II
- Synthèse et rapport sur l'aménagement hydro-agricole des marais.

### **1.3. Revue de la littérature - Evapotranspiration**

Du point de vue hydrologique, un des éléments-clefs pour mesurer l'impact du développement hydro-agricole des tourbières du Rugezi, c'est l'évapotranspiration. Une revue de la littérature sur le sujet a donc permis d'ajuster notre approche en tenant compte de la spécificité du problème, c'est-à-dire l'évapotranspiration en altitude (2 000 m), dans un climat équatorial et , de surcroît, pour des tourbières à sphaignes.

Comme le mentionne Morton (1983), l'évapotranspiration est la composante du cycle hydrologique la plus influencée par l'occupation des sols et les changements de climat. Par contre c'est aussi la composante la plus méconnue à cause des problèmes de mesures (lysimètre ou autres) qui ne permettent que des observations ponctuelles. On a donc, au cours des années, développé des relations empiriques ou semi-empiriques pour calculer l'évapotranspiration.

#### **1.3.1. Evaporation des marais**

En 1946, Blaney et Ewing mesurèrent l'évaporation attribuable à des plantes marécageuses à partir d'un bac installé dans un marais de San Luis Rey en Californie. Ils comparèrent les résultats obtenus avec ceux que l'on trouve pour un lac et trouvèrent que l'évaporation des marais était d'environ 25% supérieure à celle des lacs. Malheureusement, l'évaporation des lacs de référence était déterminée indirectement à partir de l'évaporation de bacs et ne tenait pas compte de l'humidité ou du vent.

En 1948, Penman mit au point une formule pour prédire l'évaporation de plans d'eau. Combinant bilan énergétique et approche aérodynamique, la méthode de Penman allait être modifiée (Kohler et Parmele, 1967) pour permettre le calcul de l'évapotranspiration des cultures grâce à l'application de coefficients cultureux déterminés expérimentalement.

Entretiens, en 1963, Penman, citant des résultats obtenus par Migahid pour un marais de papyrus en Ouganda, suggère que l'évaporation des marais est égale à celle d'un plan d'eau libre.

D'autre part Gel'bukh (1964) rapporte que des mesures faites en Russie donnaient un rapport entre l'évaporation de marais et celle de plans d'eau variant entre 0,8 et 2,5. En 1969, Rijks constata que l'évaporation de marais papyrus pouvait être la moitié moindre de celle d'un plan d'eau lorsqu'il s'agit de vieilles pousses de papyrus. Les résultats cités précédemment par Penman faisaient plutôt référence à des papyrus relativement jeunes. Rijks en conclut que les roseaux et tiges de papyrus qui atteignent jusqu'à 3,8 m de hauteur dissipent jusqu'à 30% de l'énergie de radiation.

### **1.3.2. Evaporation des tourbières**

Ces considérations nous amènent donc à être très vigilant quant à l'utilisation de coefficients mesurés pour des marais de papyrus ou de roseau alors que nous avons à analyser l'évapotranspiration de tourbières à sphaignes, d'autant plus que Linacre et al. (1970) ont constaté qu'en région aride, les roseaux peuvent réduire l'évaporation, alors qu'en région humide comme au Rwanda, ils peuvent la favoriser.

Par contre, Romanov (1968) allait jeter un peu plus de lumière sur les phénomènes d'évaporation typiques aux tourbières. A partir de bilans hydriques, il a remarqué que le processus d'évaporation des tourbières est tout à fait différent de celui des lacs et dépend largement du processus de croissance des plantes composant la tourbière. Ainsi, en début d'été, les tourbières évaporent jusqu'à 36% plus d'eau qu'un lac alors qu'à la fin de l'été, l'inverse se produit. Ce phénomène s'explique par les faibles capacités et conductivités thermiques des sphaignes. En définitive, l'évaporation des tourbières dépend largement du cycle de croissance des plantes et du niveau de la nappe phréatique. Le processus d'évaporation des tourbières est donc nettement différent de celui des lacs ou réservoirs.

Romanov n'a pas noté non plus de relation significative entre l'évaporation et la vitesse du vent. Ces constatations amènent Dolan (1984) à proposer l'utilisation d'un modèle basé sur la production de bio-masse et les variations du niveau d'eau des tourbières.

L'application d'un tel modèle nécessite des mesures ponctuelles spécifiques pour permettre sa calibration. L'application de ces mêmes paramètres à une région très différente comme celle du Rwanda n'est pas recommandée sans calibration.

Ces constatations suggèrent donc de comparer l'évaporation des tourbières non pas avec celle d'un plan d'eau, mais plutôt par rapport à l'évapotranspiration de cultures de références, comme c'est le cas dans les calculs d'irrigation. On parle alors d'évapotranspiration potentielle.

### **1.3.3. Evapotranspiration potentielle et de surface**

Roose et al. (1983) notèrent que l'évapotranspiration potentielle est relativement constante en milieu équatorial. De plus, le réseau météorologique du Rwanda permet d'utiliser des méthodes à plusieurs paramètres comme celles de Penman ou de Morton de préférence à celles de Blaney-Criddle ou de Thorntwaite.

La méthode de Penman (1948) est certes celle qui est la mieux documentée et pour laquelle l'application de coefficients culturaux a été largement diffusée (Doorenbos, 1975). Il est vrai cependant, comme l'a mentionné Morton (1983), que la complexité de la relation sol-plante rend difficile l'application de coefficients culturaux. Par contre, ce dernier reconnaît que la méthode de Penman modifiée (Kohler, Parmele 1967) donne des résultats précis dans des conditions de climat humide où la température d'équilibre est proche de la température de l'air comme c'est le cas au Rwanda.

En contrepartie, Morton propose une approche complémentaire à celle de l'évapotranspiration potentielle. Cette relation s'appuie sur l'interaction entre l'atmosphère et la couverture du sol.

Elle est basée sur des équations empiriques ajustées en fonction de bilans hydriques à long terme. En définitive, dans un environnement totalement sec, l'évapotranspiration de surface devient nulle alors que l'évapotranspiration potentielle devient le double de celle en milieu humide. Dans un environnement humide, par contre, l'évapotranspiration potentielle devient égale à l'évapotranspiration de surface.

Ce concept mis de l'avant par Morton est très intéressant, quoiqu'il soit basé sur des relations empiriques encore peu expérimentées.

Sharma (1988) a comparé les méthodes de Penman et de Morton sur les bassins de Chambezi et Kafue en Zambie. L'étude a révélé que sur une base annuelle, l'estimation de l'évapotranspiration par la méthode de Morton se comparait très bien avec les résultats de bilans hydriques.

D'autre part, la méthode de Penman a donné de meilleurs résultats pour l'estimation de l'évapotranspiration des marais de Lukanga. Ceci nous amène donc à privilégier la méthode de Penman modifiée plutôt que celle de Morton pour le calcul de l'évapotranspiration des tourbières du Rugezi.

#### **1.3.4. Evapotranspiration en milieu montagneux**

Règle générale, le monde scientifique s'entend pour dire que l'évapotranspiration, tout comme la température, décroît avec l'altitude. D'autre part, les recherches de Henning et Henning (1981) montrent que cette baisse est très faible dans les régions montagneuses dépourvues de couvert de neige. Ces résultats furent obtenus en appliquant la méthode de Penman à diverses régions montagneuses du globe. L'étude a permis de conclure que les différences dans l'estimation de l'évapotranspiration entre sites adjacents est minime lorsqu'on applique la méthode de Penman. Ainsi, on peut transposer les résultats de la station synoptique de Ruhengeri pour le calcul de l'évapotranspiration aux Marais Rugezi situés à une trentaine de kilomètres plus à l'est.

#### 1.4 Méthodologie

Afin de répondre aux problèmes de gestion de la ressource en eau soulevés précédemment, l'étude s'est donc faite en respectant le cheminement suivant:

##### a) Reconnaissance des lieux et cueillette d'informations

Dans un premier temps, l'auteur s'est d'abord concentré sur la reconnaissance des lieux et la cueillette de données. En plus des informations recueillies entre 1984 et 86 alors qu'il était en poste dans la région à l'étude, une mission de six semaines (du 4 novembre au 15 décembre 1987) a été consacrée essentiellement à la visite détaillée du bassin versant, la cueillette et le rassemblement de toutes les données disponibles tant du point de vue météorologique, hydrologique et géologique, que du point de vue énergétique et agricole. A cela il faut également ajouter des rencontres avec les responsables des ministères et organismes concernés afin de couvrir les divers aspects institutionnels entourant la question.

##### b) Validation et mise en forme des données

Compte tenu de la disparité des sources d'informations et des moyens très restreints dont dispose le Rwanda pour compiler les données d'ordre hydrométéorologique, une bonne part du travail a consisté à rassembler les données, les mettre sur fichiers informatisés puis en faire la validation par méthodes statistiques ou autres. Rappelons que de meilleures données mènent à de meilleures décisions dans la conduite d'un projet (Chow, 1964). Cette étape de validation des données, quoique laborieuse, a cependant permis d'écarter ou de corriger des données de précipitations, d'ajuster des valeurs de ruissellement et finalement d'amener des recommandations pour améliorer le système en place.

##### c) Analyse hydrologique

Malgré certaines déficiences rencontrées dans les données disponibles, il a quand même été possible de procéder à une analyse hydrologique du système. On a d'abord subdivisé le bassin en trois sous-bassins qui sont le Rugezi, le Bulera et le Ruhondo.

Par la suite, la méthode d'analyse tient compte des faits suivants: premièrement, le drainage des marais allait influencer sur l'évapotranspiration et le stockage de l'eau; deuxièmement, la base de données dont nous disposons ne permet pas d'évaluer de façon fiable l'évaporation ou l'évapotranspiration sur des périodes de moins d'un mois et préférablement d'une année (OMM, 1974). Ces contraintes nous ont amené à modéliser le système suivant un cycle hydrologique annuel basé sur un bilan hydrique pour le sous-bassin Rugezi. La relation de base a donc la forme suivante:

$$R = P - EV - ET - I \pm S \quad [1.1]$$

où R = Ruissellement annuel moyen  
P = Précipitation annuelle moyenne  
EV = Evaporation annuelle moyenne  
ET = Evapotranspiration annuelle moyenne  
I = Infiltration profonde  
S = Variation dans le stockage

Le ruissellement est mesuré directement soit aux turbines des centrales, soit à une station limnimétrique. Les précipitations annuelles moyennes sont établies suivant la méthode des isohyètes. Sur une base annuelle, la variation de stockage dans le système est nulle.

Finalement, il reste comme inconnues dans cette relation, les valeurs d'évaporation (EV) et d'évapotranspiration (ET) et enfin d'infiltration profonde (I).

Compte tenu que le socle de la région est composé de roches imperméables métamorphisées, nous allons poser comme hypothèse que cette valeur est négligeable et appliquer la relation 1.1 pour déduire EV et ET. Pour ensuite vérifier cette hypothèse, nous allons comparer les valeurs obtenues avec les valeurs déduites à partir des données d'évaporation du bac de la station de Ruhengeri et celles déduites suivant la méthode de Penman et la méthode de Turc.

Si les résultats sont comparables, nous allons considérer que l'hypothèse est vérifiée.

d) Modélisation

Pour nos besoins, l'équation du bilan hydrique validée par deux méthodes indirectes (bac, Penman ou Turc) sera appliquée pour le sous-bassin Rugezi uniquement afin d'isoler la composante - Marais. Par la suite, le volume de ruissellement sortant des marais sera comparé en termes de pourcentage par rapport aux volumes sortant des Lacs Bulera et Ruhondo pour les années 1961 à 1986.

e) Simulation

Certaines caractéristiques hydrologiques des marais seront modifiées par les nouvelles pratiques agricoles, notamment l'évapotranspiration et le stockage de l'eau. On pourra simuler l'effet de l'aménagement hydro-agricole du marais en modifiant certains paramètres qui tiendront compte des pratiques culturales et en posant également certaines contraintes quant à l'exploitation des marais à des fins hydro-agricoles.

f) Conclusions et recommandations

A la lumière des résultats obtenus, le document tentera de répondre aux questions posées plus haut. Des recommandations suivront ensuite afin de s'assurer que le conflit d'utilisation des ressources en eau du bassin de la Mukungwa ne vienne pas perturber le processus de développement à long terme du Rwanda. Ces recommandations viseront donc la bonne gestion des ressources en eau du bassin-versant.

## 2.0 - LE RWANDA

### 2.1 Situation géographique

Le Rwanda est situé au centre-Est du continent africain, entre l'Ouganda au Nord, le Burundi au Sud, le Zaïre à l'Ouest et la Tanzanie à l'Est. Il est caractérisé par:

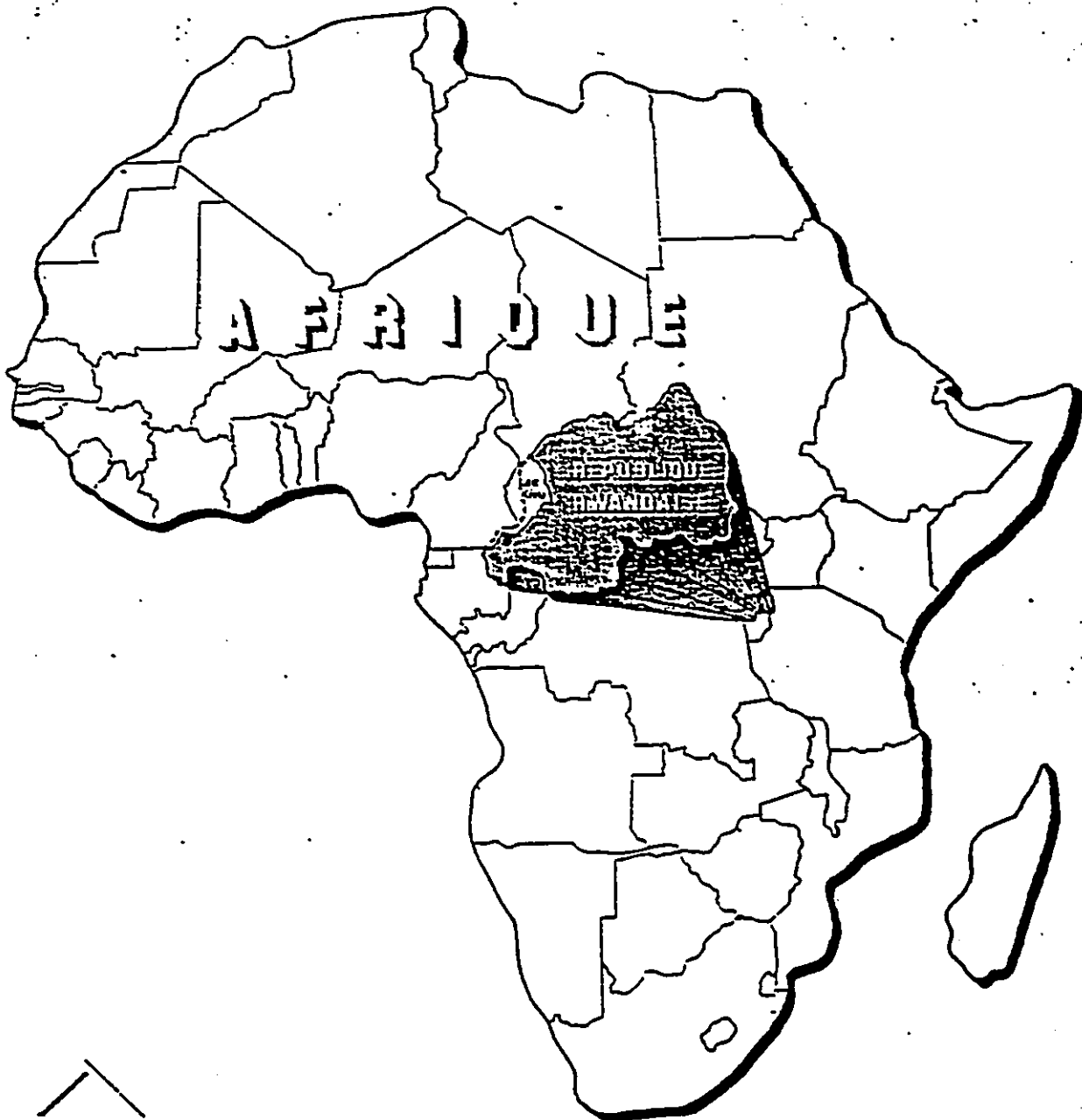
- sa faible superficie: 26 000 km<sup>2</sup>;
- son enclavement; il est situé à plus de 1000 km des côtes les plus proches, celles de l'océan Indien;
- son paysage montagneux et sa haute altitude;
- son importante densité de population: 210 habitants au km<sup>2</sup>; 400 habitants au km<sup>2</sup> de terre agricole. Il s'agit de la plus forte densité d'Afrique continentale.

En 1985, le Rwanda comptait environ 6 millions d'habitants dont 45% avaient moins de 15 ans. Le taux d'accroissement de la population est de 3,7% par an, un des plus élevés au monde. A ce taux, la population peut doubler tous les quinze ans environ. Quelque 5% de la population habite la ville. La principale ville est Kigali, la capitale, avec plus de 120 000 habitants. La population se divise en trois ethnies: les Hutus (84%), les Tutsis (15%) et les Twas (1%).

Le relief est composé d'une série de plateaux, montagnes et collines d'altitude de plus en plus élevée d'est en ouest. Le paysage est principalement marqué par la savane à l'est, les hauts plateaux au centre et la crête Zaïre-Nil à l'ouest. Cette dernière, plus à l'ouest, redescend vers le lac Kivu, principale masse d'eau du pays. Le nord est dominé par une chaîne de volcans, les Virunga (Gotanegre et al., 1975).

FIGURE 2.1

# République Rwandaise



Le climat, généralement tempéré (température moyenne de 19° C), varie en fonction de l'altitude. La pluviométrie se partage en saisons sèches et saisons de pluies. A l'est du pays se trouve une zone semi-aride.

## **2.2 Situation économique**

Le Rwanda est un des pays les plus pauvres du monde avec un produit national brut annuel par habitant de 280 \$ U.S. Toutefois, le niveau de vie de la population n'est probablement pas aussi médiocre que dans certains pays africains au PNB par habitant plus impressionnant.

Le pays est essentiellement agricole; environ 93% de la population active oeuvre dans ce secteur qui compte pour quelque 45% du PIB. Quant aux secteurs des industries et des services, ils occupent respectivement 3 et 4% de la population active pour une part du PIB de 21 et 34%. Le déséquilibre entre le pourcentage de la population oeuvrant dans le secteur agricole et la portion du PIB qu'il représente s'explique par la part non comptabilisée de la production de ce secteur ainsi que par la faiblesse des prix des produits agricoles par rapport aux prix des services et de la production industrielle (Banque Mondiale, 1987).

Les cultures vivrières constituent l'essentiel de la production du secteur agricole. Cette production est en majeure partie consommée par la famille exploitante. Le pays produit aussi du thé et du café, qui comptent pour les trois quarts de ses exportations. L'agriculture se trouve actuellement aux prises avec toute une série de problèmes dont plusieurs sont superficiellement attribuables à l'importante pression démographique sur les terres. Le pays est généralement autosuffisant en produits agricoles.

Le secteur industriel est peu développé. Il est essentiellement composé d'une centaine d'entreprises de diverses importances ainsi que d'une industrie minière. Les industries agro-alimentaires contribuent à la plus grand partie de la production. Le secteur minier fournit le quart des exportations du pays.

Le pays est peu endetté et sa balance commerciale est positive. "Le Rwanda est généralement considéré comme un des pays les mieux gérés d'Afrique" (Min. des Relations Intergouvernementales du Québec, 1987).

Parmi les principaux obstacles au développement du pays figurent:

- l'enclavement qui augmente considérablement le coût des importations et des exportations rwandaises;
- la pénurie et l'exiguïté des terres.

Le pays, peu doté en terres et en minerais, dispose cependant de certains atouts: la quasi-absence de certains fléaux courants sous cette latitude (mouche tsé-tsé, par exemple), la cohésion culturelle et le dynamisme de la population.

### 2.3 Fiche technique

Superficie	:	26 000 km <sup>2</sup>												
Population	:	6,0 millions												
Population urbaine	:	5%												
Croissance démographique	:	3,7%/an												
Pop. en âge de travailler	:	49%												
Pop. active par secteur	:	<table><thead><tr><th></th><th><u>1965</u></th><th><u>1980</u></th></tr></thead><tbody><tr><td>Agriculture</td><td>94%</td><td>93%</td></tr><tr><td>Industrie</td><td>2%</td><td>3%</td></tr><tr><td>Services</td><td>3%</td><td>4%</td></tr></tbody></table>		<u>1965</u>	<u>1980</u>	Agriculture	94%	93%	Industrie	2%	3%	Services	3%	4%
	<u>1965</u>	<u>1980</u>												
Agriculture	94%	93%												
Industrie	2%	3%												
Services	3%	4%												
PNB par habitant (1985)	:	280 \$ U.S.												
PIB total (1985)	:	1710 millions \$ U.S.												
PIB par secteur (1985)	:	<table><tbody><tr><td>Agriculture</td><td>45%</td></tr><tr><td>Industrie</td><td>21%</td></tr><tr><td>Services</td><td>34%</td></tr></tbody></table>	Agriculture	45%	Industrie	21%	Services	34%						
Agriculture	45%													
Industrie	21%													
Services	34%													
Dettes publiques extér. (1985)	:	324 millions \$ U.S.												
Dettes publiques extér. en % du PNB	:	19,1%												
Service de la dette extér. publique en % des export.:	:	4,3%												

### Division administratives

10 préfectures

143 communes

### Agriculture

Indice moyen de la production alimentaire par habitant (1979-1981 = 100)	:	1983-1985	:	106
Apport journalier de calories par hab.	:	1985	:	1919
Importations céréalières	:	1985	:	24 000 t
Aide alimentaire (céréales)	:	1984-1985	:	36 000 t
Principales productions agric. vivrières	:	sorgho, manioc, plantain.		
Principales productions agric. d'export.	:	café, thé.		

## **2.4 Développement agricole**

A l'origine, on cultivait avant tout les sommets des collines, les versants et les vallées étant réservées aux pâturages. Aujourd'hui, avec l'explosion démographique, les versants et les vallées sont mis en culture. On constate aussi un recul de la limite de terres d'altitude mises en exploitation.

Enfin, de nouvelles terres ont été conquises sur les forêts, les marécages et les régions semi-arides de l'Est, parfois spontanément, parfois avec l'aide de l'État et d'intervenants étrangers. C'est le cas notamment du projet de développement des marais Rugezi qui a bénéficié jusqu'à présent de l'aide financière et technique de la France et du Japon.

Depuis 1962, date de l'indépendance, le gouvernement Rwandais a dû tenir compte de cinq facteurs majeurs affectant le développement du pays afin de mettre de l'avant des politiques économiques appropriées:

- l'augmentation rapide de la population;
- la pénurie de terres agricoles;
- le caractère extensif de l'agriculture rwandaise (techniques rudimentaires, rendements relativement faibles, etc...);
- la dégradation du milieu naturel (érosion, pénurie de combustibles ligneux et de matériaux de construction ligneux, etc...);
- l'enclavement (coûts d'importation et d'exportation très élevés, délais, etc...).

Plusieurs observateurs s'accordent pour dire que, depuis l'indépendance, le Rwanda se distingue de l'ensemble des pays africains par ses politiques économiques modestes et réalistes. L'agriculture a toujours été considérée par l'État rwandais comme le secteur prioritaire de l'économie. Ce secteur s'est vu fixer deux principaux objectifs:

- assurer l'autosuffisance alimentaire du pays;
- permettre d'équilibrer la balance commerciale rwandaise.

Les politiques mises de l'avant pour atteindre ces objectifs ont été le plus souvent basées sur l'exploitation agricole familiale et le secteur privé. L'État s'est peu engagé en tant que producteur direct, et seuls le thé et le café, productions vitales pour le pays (elles représentent la majeure partie des exportations), font l'objet d'un monopole commercial d'État. Les prix des denrées alimentaires produites localement ne sont pas fixés par l'État.

#### **2.4.1 Contraintes**

La population rwandaise augmente de 3,7% par année, taux considéré comme l'un des plus élevés au monde. Ce phénomène s'explique par:

- l'augmentation de l'assistance médicale ainsi que la relative disparition des troubles politiques, disettes et épidémies;
- le maintien d'une forte natalité attribuable à des facteurs économiques et culturels.

Jusqu'ici, la production alimentaire a pu suivre l'augmentation de la population. Dans ce pays déjà densément peuplé, l'augmentation de la production a été possible sans avoir recours à une intensification (augmentation de la productivité) de l'agriculture. Les principales stratégies utilisées ont été:

- la mise en valeur des zones marginales: régions de l'est et du sud-est à faible pluviométrie et où sévissait la mouche tsé-tsé, versants et bas fonds jusque là jugés trop insalubres, terres se situant à une altitude de plus en plus élevée;
- le raccourcissement ou la disparition de la jachère (16% des terres arables en 1975, 12,5% en 1985);
- le déboisement et la mise en culture des terres de pâturage;
- la sophistication des associations culturales.

Toutefois, certaines de ces stratégies ont entraîné différents problèmes, parmi lesquels l'érosion et des crues de plus en plus dévastatrices dans les vallées.

#### **2.4.2 Perspectives**

Les réserves de terres sont presque complètement épuisées et la population augmente toujours. Environ 57% des exploitants disposent de moins de 1 hectare à cultiver; 30% disposent de moins de 50 ares. La terre est toujours cultivée selon des techniques qui ne permettent d'obtenir que des rendements limités. La dégradation des conditions d'exploitation laisse prévoir une chute probable de la fertilité des terres cultivées.

Les observateurs et le pouvoir public rwandais s'accordent pour dire que l'absorption de la croissance de la population devra désormais passer par:

- l'intensification de l'agriculture via l'élaboration de nouveaux systèmes de mise en valeur peu coûteux en argent et en technologies;
- l'industrialisation de petite échelle avec utilisation intensive de main-d'oeuvre;
- la lutte anti-érosive afin de préserver les terres existantes;
- le freinage de l'expansion démographique par l'émigration. Ainsi, les autorités envisagent la possibilité de favoriser un courant d'émigration vers le Zaïre, le Gabon et la Tanzanie après accord avec les États concernés.

L'utilisation rationnelle des marais à des fins agricoles représente donc une solution d'avenir pour le pays en autant que l'on fasse appel à des techniques de mise en valeur peu coûteuses et efficaces.

## 2.5 Développement énergétique

### 2.5.1 Les ressources énergétiques

Traditionnellement, le bois, destiné en particulier à la cuisson, est la ressource la plus sollicitée. Un potentiel exploitable existe en énergie hydraulique ainsi que dans le domaine des énergies non conventionnelles. Au nord du pays, dans la région des volcans, des recherches et des études menées dans le but d'estimer le potentiel probable en énergie géothermique et les moyens de le mettre en valeur économiquement ont donné des résultats négatifs jusqu'à présent. Il n'y a par contre aucun gisement pétrolier prouvé (Dos Ghali et al, 1984).

#### Les énergies non conventionnelles

Sous cette appellation sont regroupées les énergies non encore utilisées de façon courante. A la frontière ouest avec le Zaïre, le lac Kivu contient du gaz méthane dissous dans ses couches profondes (à partir d'environ 100 m). La ressource exploitable probable est de  $50 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  correspondant à 460 000 GWh. Le renouvellement est estimé à  $50 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3$  par an et la part revenant au Rwanda représente 70 GWh/an. Une autre ressource, inhabituelle mais importante, est la tourbe. Il en existe de grandes quantités (plus de 500 millions de  $\text{m}^3$  prouvés), dont malheureusement l'exploitation pose d'énormes problèmes tant du point de vue technique qu'écologique (Deuse, 1966).

Le papyrus, qui pousse de façon très dense et très rapide, est également un agent énergétique intéressant. "Réduit sous forme de briquettes compactes et sèches, il pourrait fournir une énergie brute de plus de 600 GWh/an". Une briquetterie industrielle (Ruliba) prévoit l'utilisation de cette source d'énergie le long du fleuve Nil-Nyabarongo.

D'autres sources non conventionnelles offrent des possibilités qui méritent d'être exploitées. Bien que caractérisée par un fort pourcentage de rayonnement diffus, l'énergie solaire a été estimée à 4,2 kWh par m<sup>2</sup> et par jour, répartis de manière uniforme tout au long de l'année à cause de la position géographique du pays (pratiquement sous l'équateur). Le biogaz, produit à partir de déchets organiques, devrait être développé dans le milieu rural afin de participer à la lutte contre la déforestation.

### **2.5.2 Les ressources hydro-électriques**

Le Rwanda, par son relief et l'importance de ses précipitations, possède un potentiel hydraulique convertible en électricité de l'ordre de 355 GWh. (voir tableau I.1).

Une première partie de ce potentiel est concentrée sur deux sites frontaliers. Il s'agit tout d'abord de Rusumo (puissance installée totale de 80 MW) sur la rivière Kagera séparant le Rwanda de la Tanzanie. Le réservoir formé par le barrage s'étendrait jusqu'au Burundi. Dans le cadre de l'O.B.K., le Rwanda pourrait bénéficier du tiers de la puissance produite. Les pourparlers entre les pays concernés sont toujours en cours. La date de mise en service est prévue pour 1993.

Le second site frontalier se trouve sur la Ruzizi à la frontière du Zaïre. Ruzizi II aura une puissance installée de 40 MW dont le tiers sera réservé au Rwanda. Certains travaux de génie civil sont déjà en cours.

Le seconde partie du potentiel hydro-électrique se retrouve à l'intérieur du pays. La puissance potentielle interne est évaluée à 48 MW, dont plus de 60% provient du bassin de la rivière Mukungwa (30 MW).

Présentement les centrales de Ntaruka et Mukungwa I offrent une puissance installée de 23,7 MW.

### 2.5.3 Demande en électricité

Suivant des études du Bunep (1983), la structure énergétique du Rwanda en 1980 se présente comme suit:

- la demande totale d'énergie intermédiaire (19 000 GWh) se répartissait à raison de 95,6% pour le secteur habitat, 1,3% pour le secteur industrie, 0,8% pour le secteur services et 2,3% pour le secteur transports.
- les proportions d'utilisation des agents énergétiques sont les suivantes: 96,6% de bois et de résidus de récoltes - 2,9% de produits pétroliers - 0,4% d'électricité et 0,1% d'autres agents (solaire, tourbe, gaz, etc...).

Malgré la faible proportion d'utilisation de l'électricité relevée dans cette étude, il n'est resté pas moins que le Rwanda doit déjà importer de l'électricité du Zaïre, et que d'ici l'an 2000 la demande fera plus que quadrupler.

En effet, suivant une étude menée pour le compte de l'Electro-gaz par les Sociétés Motor-Columbus et Oskar Von Miller Sarl (1987), la consommation annuelle passera de 91,5 GWh en 1985 à 376,5 GWh en 2000. (voir tableau 2.1).

Deux facteurs sont à la base de cette croissance: le nombre d'abonnés et leur consommation spécifique (quoique cette dernière soit relativement constante). "C'est donc surtout l'accroissement du nombre d'abonnés qui provoquera cette hausse considérable de la demande en électricité" (Motor-Columbus et al, 1987).

TABLEAU 2.1 : PREVISION DES BESOINS EN ENERGIE

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Pointe MW	Croissance Pointe %	Energie produite GWh	Energie consommée GWh	Abonnés Total	Population Mio habitants 3,28 croiss./ l'année	Pointe par tête W/tête	Energie consommée par tête MWh/tête	Compteurs par Mio têtes	Temps d'utilisation (heures)
1975	6,9	-	40,605	36,598	2 674	4,385	1,57	8,346	610	5.885
1976	7,5	8,6	45,417	40,396	2 826	4,525	1,66	8,927	625	6.056
1977	8,3	10,7	50,973	44,471	3 360	4,670	1,78	9,522	719	6.141
1978	9,0	8,4	52,737	48,388	3 807	4,820	1,87	10,039	790	5.860
1979	10,6	17,7	56,471	53,341	4 187	4,974	2,13	10,723	841	5,321
1980	12,3	16,0	63,550	57,628	4 521	5,133	2,40	11,227	881	5,167
1981	14,3	16,2	72,635	63,809	5 306	5,297	2,70	12,046	1.002	5.079
1982	16,1	12,6	87,697	73,436	5 912	5,467	2,94	13,432	1.081	5,447
1983	17,1	6,2	87,206	75,390	6 940	5,642	3,03	13,362	1.230	5,100
1984	18,0	5,3	94,074	83,870	7 705	5,823	3,09	14,403	1.323	5,226
1985	19,4	7,7	98,695	91,445	9 278	6,009	3,23	15,218	1.544	5,087
1986	21,1	9,0	115,8	103,1	11 149	6,200	3,4	16,6	1.798	5,488
1987	23,0	9,0	131,0	116,6	12 687	6,400	3,6	18,2	1.982	5,696
1988	25,3	10,0	146,7	130,9	13 985	6,600	3,8	19,8	2.118	5,798
1989	28,1	11,0	164,4	147,0	15 265	6,800	4,1	21,6	2.244	5,850
1990	31,2	11,0	184,0	164,5	16 609	7,000	4,5	23,5	2.372	5,897
1991	34,6	11,0	205,4	183,8	18 020	7,300	4,7	25,2	2.468	5,936
1992	38,4	11,0	226,3	203,1	19 385	7,500	5,1	27,1	2.585	5,893
1993	41,0	12,0	248,1	222,7	20 650	7,700	5,6	28,9	2.682	5,769
1994	47,7	11,0	269,8	242,5	22 214	8,000	6,0	30,3	2.777	5,656
1995	52,9	11,0	292,2	262,9	23 691	8,200	6,5	32,1	2.889	5,523
1996	58,2	10,0	315,4	283,9	25 155	8,500	6,8	33,4	2.959	5,419
1997	63,4	9,0	339,2	306,1	26 761	8,800	7,2	34,8	3.041	5,350
1998	68,5	8,0	364,1	328,9	28 353	9,000	7,6	36,5	3.150	5,315
1999	73,3	7,0	389,4	352,6	29 994	9,300	7,9	37,9	3.225	5,312
2000	78,4	7,0	405,6	376,5	31 565	9,600	8,2	39,2	3.288	5,373

\* - Estimation étant donné que le réseau national interconnecté n'existait pas encore en 1975 - 1979)

Source: Motor Columbus et al., 1987.

#### **2.5.4 Perspectives du secteur de l'énergie hydraulique**

Suivant le plan directeur d'électrification du Rwanda, un calendrier accéléré de mise en valeur des sites hydro-électriques a été mis de l'avant.

Déjà on s'est attaqué à la réhabilitation des équipements existants telle que l'automatisation de la centrale Ntaruka. La mise en chantier de Ruzizi II, Rusumo et Mukungwa II permettra également de satisfaire la demande à partir de 1993 et jusqu'en 2000.

Au delà de l'an 2000, le Rwanda devra alors se tourner vers d'autres sources énergétiques (Thermique, nucléaire) pour satisfaire à ses besoins. La situation énergétique du Rwanda est donc épineuse et nécessite une gestion planifiée de ses ressources en eau.

### **3.0 BASSIN DE LA RIVIÈRE MUKUNGWA**

Le bassin versant de la rivière Mukungwa couvre une superficie de 1 800 km<sup>2</sup> située au Nord du Rwanda entre 29° 30' et 30° 0' de longitude Est et 1° 22' et 1° 44' de latitude Sud. (Fig. 3.1 et 3.1a).

Tributaire de Nil-Nyabarongo, la rivière Mukungwa présente des caractéristiques morphologiques très particulières liées à la formation du rift de l'Afrique orientale. La rivière est alimentée par ce qu'il est convenu d'appeler les sources du Nil et contribue ainsi à un des plus vastes et des plus importants réseaux hydrographiques du monde, celui du Nil.

### **3.1 La géologie et les sols du bassin Mukungwa**

#### **3.1.1 Géologie**

La région toute entière repose sur un soubassement de roches précambriennes dont les structures pétrographiques les plus dures émergent et les plus tendres sont érodées. De plus, la tectonique intense, les éruptions volcaniques, et les dépôts alluvionnaires ont, durant des millénaires, modifié considérablement cette structure sous-jacente (Weber et al., 1987).

Le bassin versant repose, en grande majorité, sur des formations de schistes, micaschistes et quartz des séries du Burundien (figure 3.2).

Les veines de quartzite, plus dures, forment les crêtes dans la moitié orientale de la région. Les schistes et leurs structures rocheuses associées sont fréquentes sur les pentes et les fonds de vallées où ils sont recouverts de dépôts alluvionnaires.

Les éruptions volcaniques dans les Virunga, à la fin du tertiaire et durant tout le quaternaire, ont répandu des couches successives de laves sur la roche précambrienne, au nord-ouest de Ruhengeri.

FIGURE 3.1 : SITE DE L'ETUDE

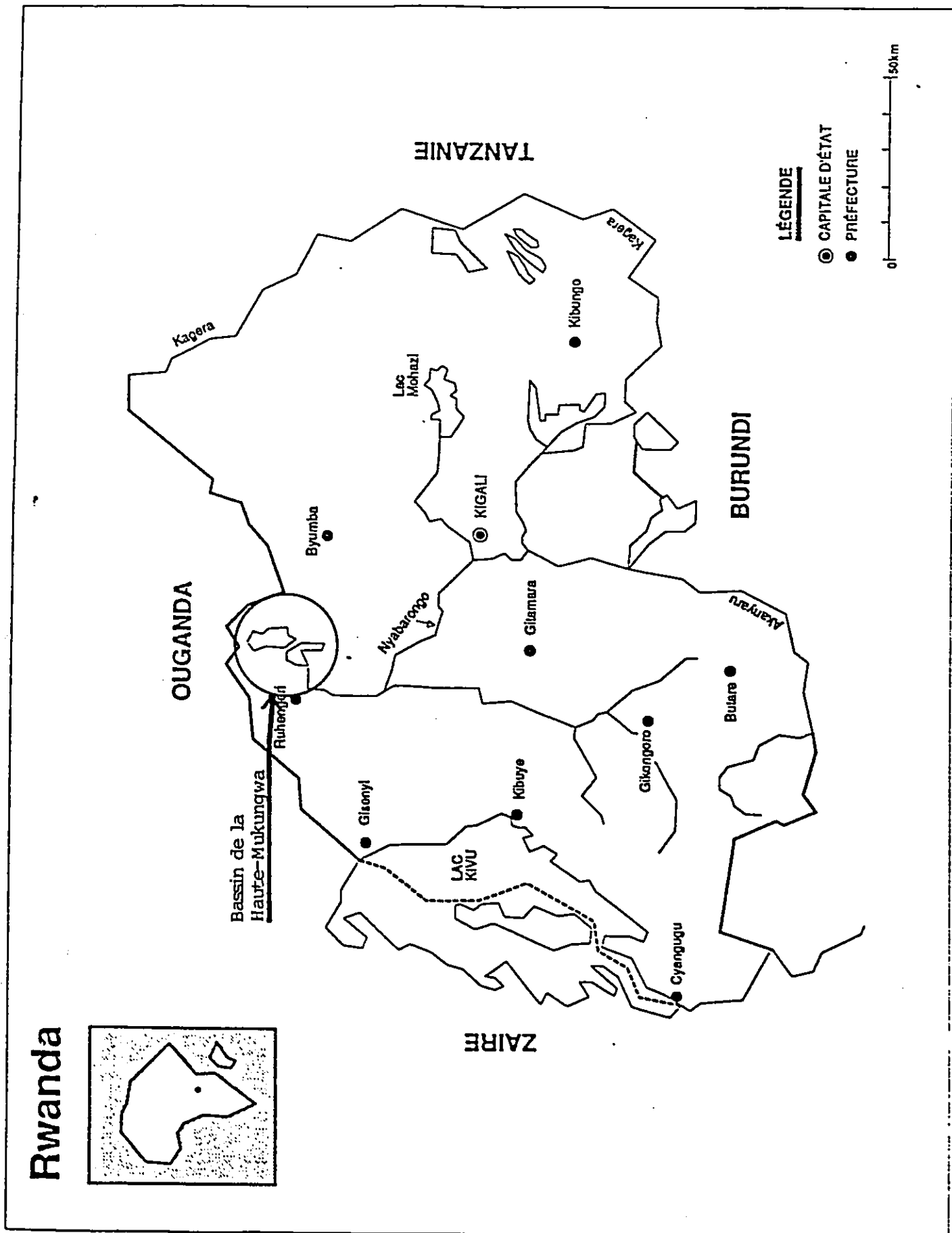
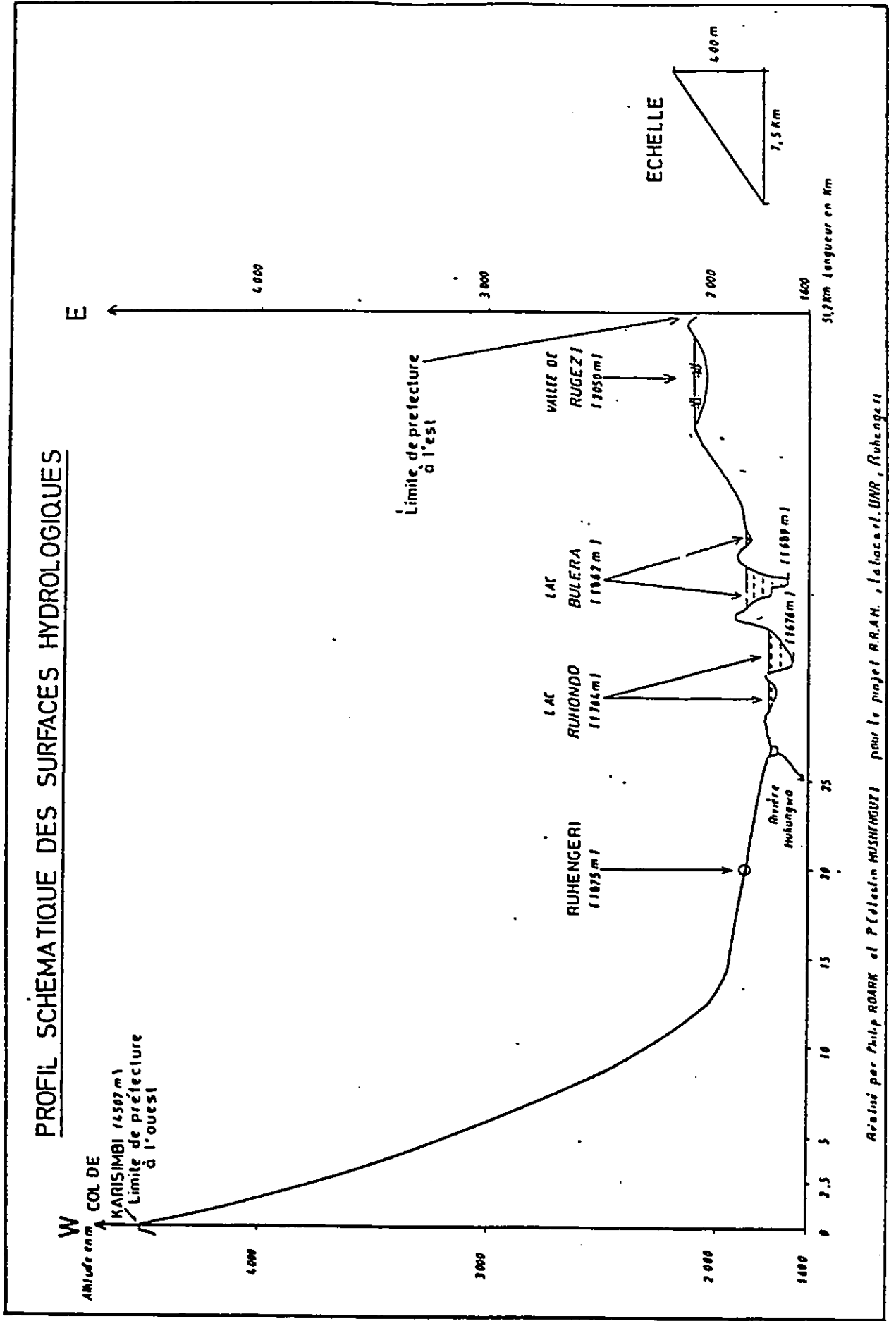




FIGURE 3.1b



Révisé par Philip ROARK et P. Celestin MUSHINGUZI pour le projet R.R.A.H., la carte I. UNR, Ruhengeri

Un tiers du bassin versant est couvert par cette roche relativement uniforme, d'origine volcanique récente. L'action des éléments sur le matériau parental tendre a produit des sols très fertiles dans presque toute cette zone, malgré une grande porosité qui empêche la formation de réservoirs d'eau de surface.

La partie sud-ouest fait partie des séries de roches métamorphiques du Ruzizien. Ces anciennes formations se sont soulevées durant le tertiaire pour former la dorsale du Rift occidental qui s'étend tout le long du Rwanda.

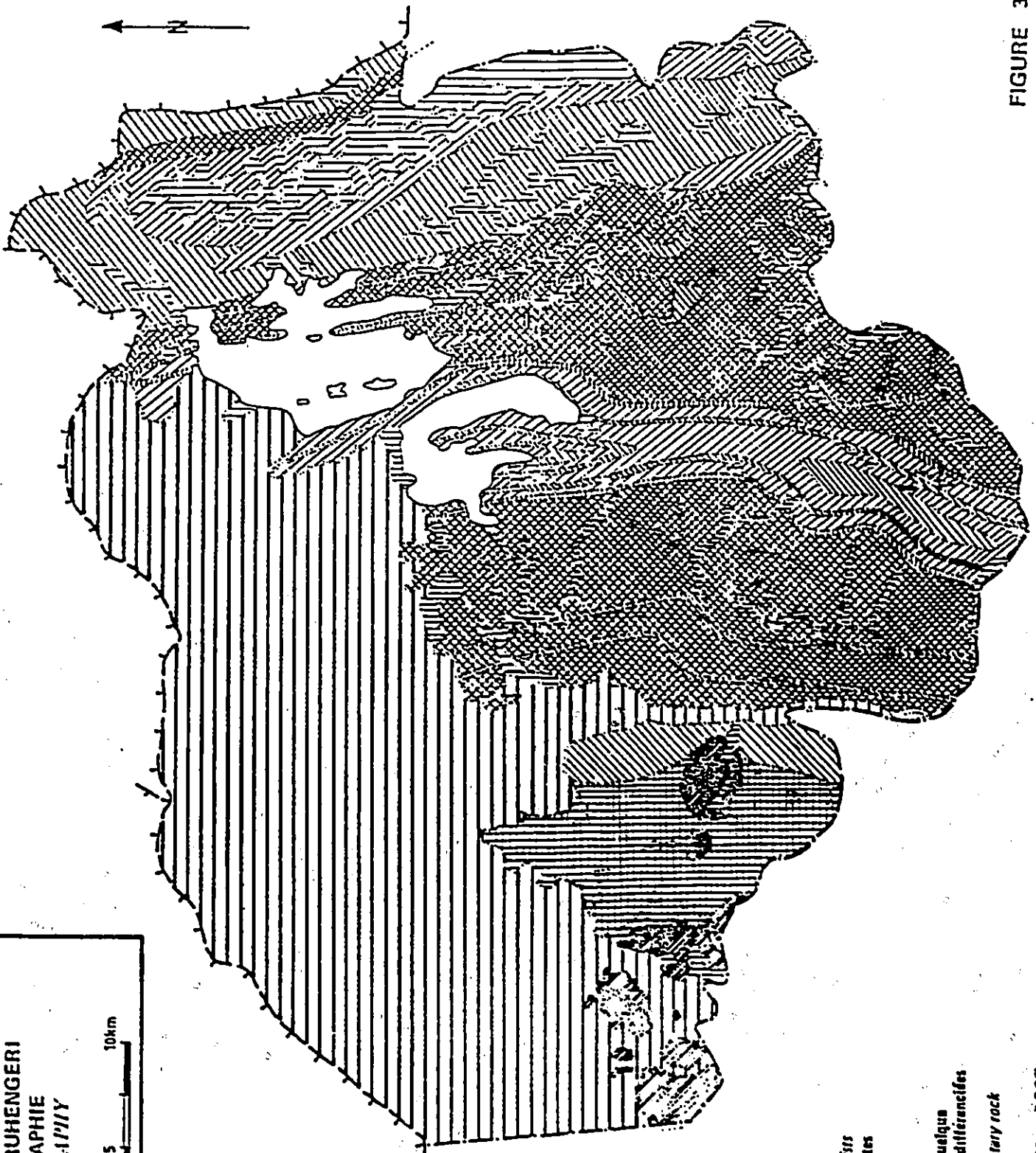
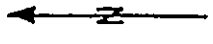
"La topographie torturée de la région résulte de multiples facteurs. Les actions violentes du volcanisme et des mouvements tectoniques ont bouleversé les reliefs initiaux. L'érosion, puis la formation d'un réseau hydrologique dense ont continué de modifier le paysage jusqu'à ses formes actuelles. Ces mêmes facteurs sont aussi largement responsables du patrimoine sol" (Weber et al., 1987).

### **3.1.2 Les sols**

Les principaux types de sols de Ruhengeri dérivent généralement de leur roche-mère sous-jacente et leurs frontières suivent le modèle des formations géologiques. Les sources de matériau parental sont donc des laves, des schistes, des granites et des quartzites. Les sols alluviaux et colluviaux, très répandus eux aussi, sont des produits composés de l'érosion de ces sources primaires et de l'accumulation de matières organiques.

Les sols d'origine volcanique (andepts) couvrent environ 55.000 ha, soit 31% de la région. Ils sont concentrés sur les champs de lave au nord du bassin versant. Leurs profils ne sont pas encore bien développés à cause de la relative jeunesse des roches structurales sous-jacentes. L'érosion ne pose pas de problème sérieux dans la majeure partie de la zone des laves car les pentes sont généralement douces.

PREFECTURE RUHENGERI  
LITHOGRAPHIE  
LITHOGRAPHY



LEGENDE - LEGEND









-  Roches granitiques, siche en pegmatites granite rock with pegmatites
-  Laves, breches, tufs Lava, breccia, tuff
-  Gres, quartzites avec peu de schistes Sandstone, quartzites with some schists
-  Alluvions Alluvium
-  Schistes, micaeschistes phillimites Schists, mica schists, phillinite
-  Schistes, micaeschistes quartzeux Schists, quartzite, mica schists
-  Quartzites et metaquartzites schisteux Quartzite, schistic metaquartzite
-  Roches granitiques avec quelques roches sedimentaires non differentiees Granite rock with some nondifferentiated sedimentary rock

FIGURE 3.2

SOURCE : RRAM - 1987

Des sols originaires du schiste occupent principalement la portion orientale du bassin versant. On en trouve aussi dans le secteur sud-ouest combinés à des éléments quartzitiques. Des oxisols dominent toute cette vaste région, intercalés d'entisols lithiques moins profonds sur les crêtes quartzitiques.

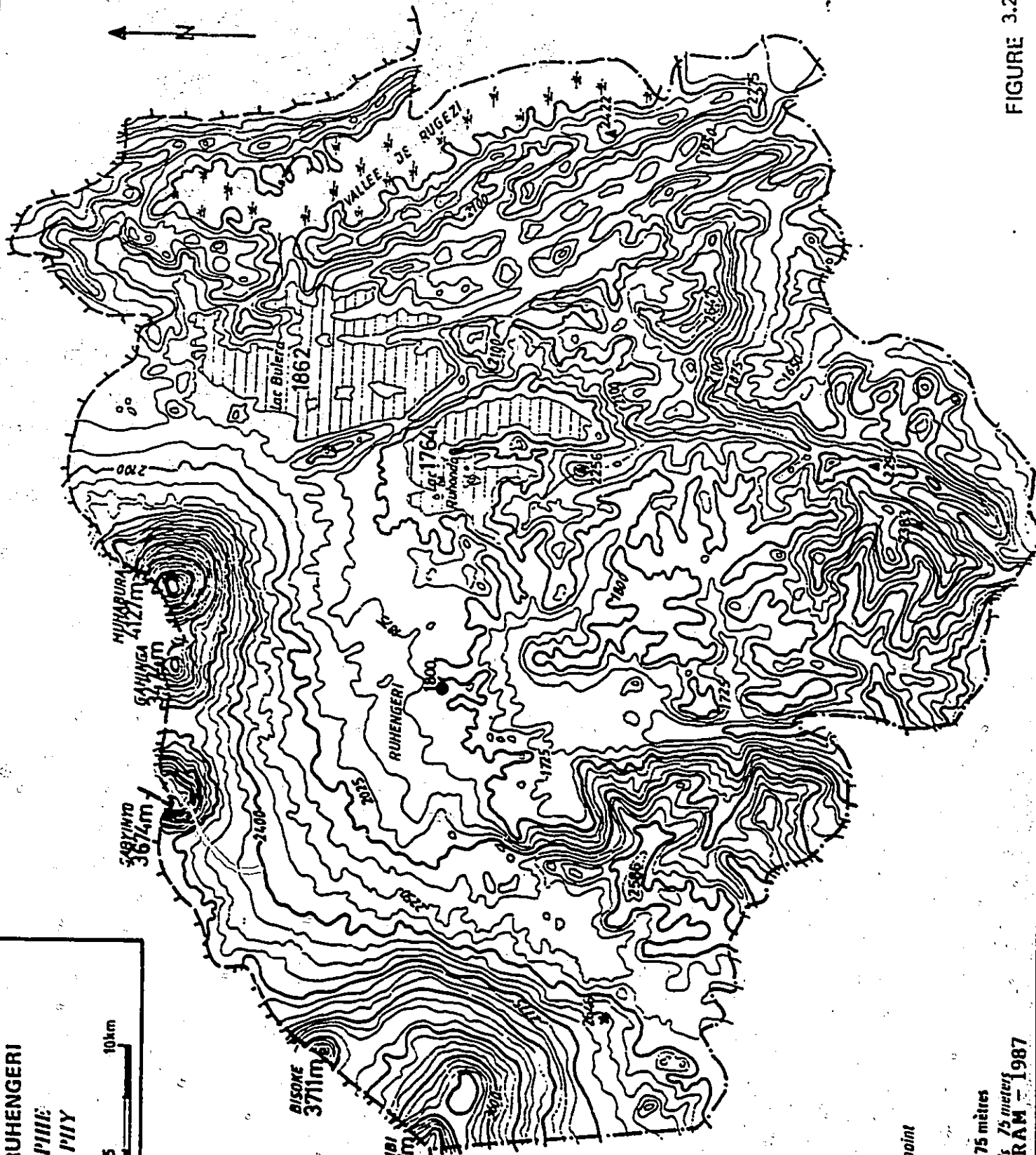
Les oxisols sont généralement bien drainés et acides et présentent d'excellentes caractéristiques physiques. En même temps, leurs propriétés chimiques sont pauvres. On les considère comme de bons sols de culture pourvu que leurs éléments nutritifs et leur teneur en matière organique soient maintenus. Cependant, leur horizon "A" peut facilement s'éroder, avec une réduction importante du pouvoir de rétention d'eau et une perte de fertilité.

Les sols dérivés des quartzites sont concentrés le long des crêtes orientées nord-sud dans l'est de la région où ils sont classés comme entisols lithiques. Ces sols sont généralement caractérisés par leur texture pauvre, leur profil squelettique, leur potentiel agricole limité et leur risque d'érosion élevé.

Les sols alluviaux et colluviaux couvrent des milliers d'hectares sous les marais et dans les fonds des vallées de toute la partie non volcanique de la région. La plupart de ces sols minéraux et jeunes, sont formés de dépôts produits de l'érosion des collines et ils sont classés comme fluents dans le groupe des entisols. Ils sont fertiles et ont un excellent potentiel agricole pourvu qu'on leur applique des techniques d'aménagement convenables.

Les histosols représentent une plus petite classe de sols alluviaux. On les trouve principalement dans les grandes formations tourbeuses du marais de Rugezi et dans de petites cuvettes dispersées çà et là dans

**PREFECTURE RUHENGERI  
TOPOGRAPHIE  
TOPOGRAPHY**



**LEGENDE - LEGEND**

- Courbe Maitresse  
Main contour
  - Courbe Secondaire  
Secondary contour
  - Point coté  
Measured reference point
  - Elevation en mètres  
Elevation in meters
  - Coupes de niveau 75 mètres  
Contour line intervals 75 meters
- SOURCE : RRAM - 1987**

**FIGURE 3.2a**

le paysage. Ces sols organiques sont naturellement difficiles à aménager à cause de leurs déficiences en éléments nutritifs et de leur inondation. Ils se tassent facilement et se dessèchent excessivement s'ils sont mal drainés ou mal exploités (Jaton, 1977; Weber et al., 1987).

## **3.2 Réseau hydrographique de la Mukungwa**

### **3.2.1 Paléo-drainage**

Partant de l'hypothèse que les eaux s'écoulaient vers le nord dans le bassin du fleuve Zaïre, on explique la naissance de la Mukungwa et des lacs Kivu, Bulera et Ruhondo ainsi que des marais Rugezi par le soulèvement du versant Est du Rift accompagné d'éruptions volcaniques et la subsidence de la cuvette du Victoria.

L'apparition des volcans de la chaîne des Virunga a provoqué un phénomène de barrage et la réorganisation du drainage (figures 3.3 et 3.3a). Cette inversion datant du quaternaire ancien et moyen a donné naissance aux marais ainsi qu'aux lacs Bulera et Ruhondo qui font l'objet de la présente étude.

"Il n'est pas douteux que les Lacs Bulera et Ruhondo sont des lacs liés à la construction de la chaîne volcanique des Virunga qui a barré d'anciennes vallées s'écoulant primitivement vers le nord" (Battistini, 1981).

Ces anciennes vallées étaient logées dans un relief appalachien d'orientation SSE - NNO et étaient traversées par les paléo-rivières Bulera et Ruhondo. Le manteau de laves issu de l'activité volcanique au nord-ouest du pays, jouant le rôle de barrage, va provoquer l'engorgement de ce proto-système de vallées fluviales à l'aval. Il y aura accumulation progressive de l'eau sans évacuation apparente. Quand le niveau de l'eau va atteindre la hauteur des barres quartzitiques dans lesquelles ces eaux étaient emprisonnées, il va se produire un débordement des lacs ainsi créés (Gatete et al., 1986).

FIG 3.3a : Schéma du drainage actuel

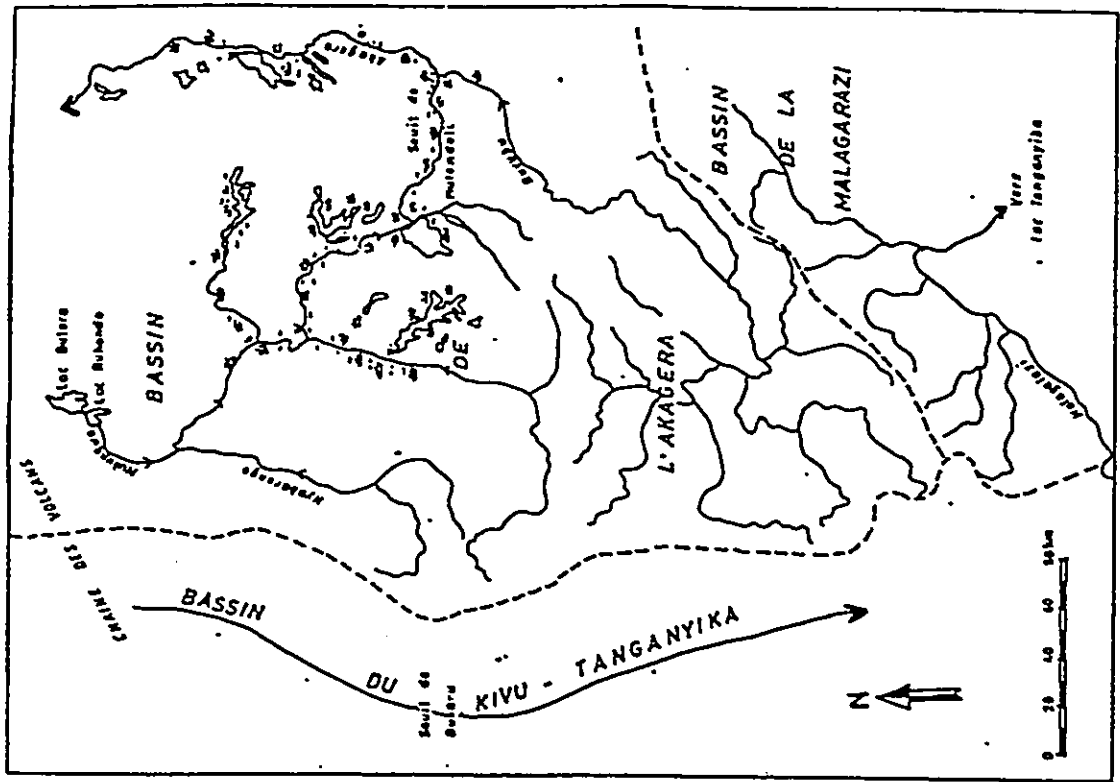
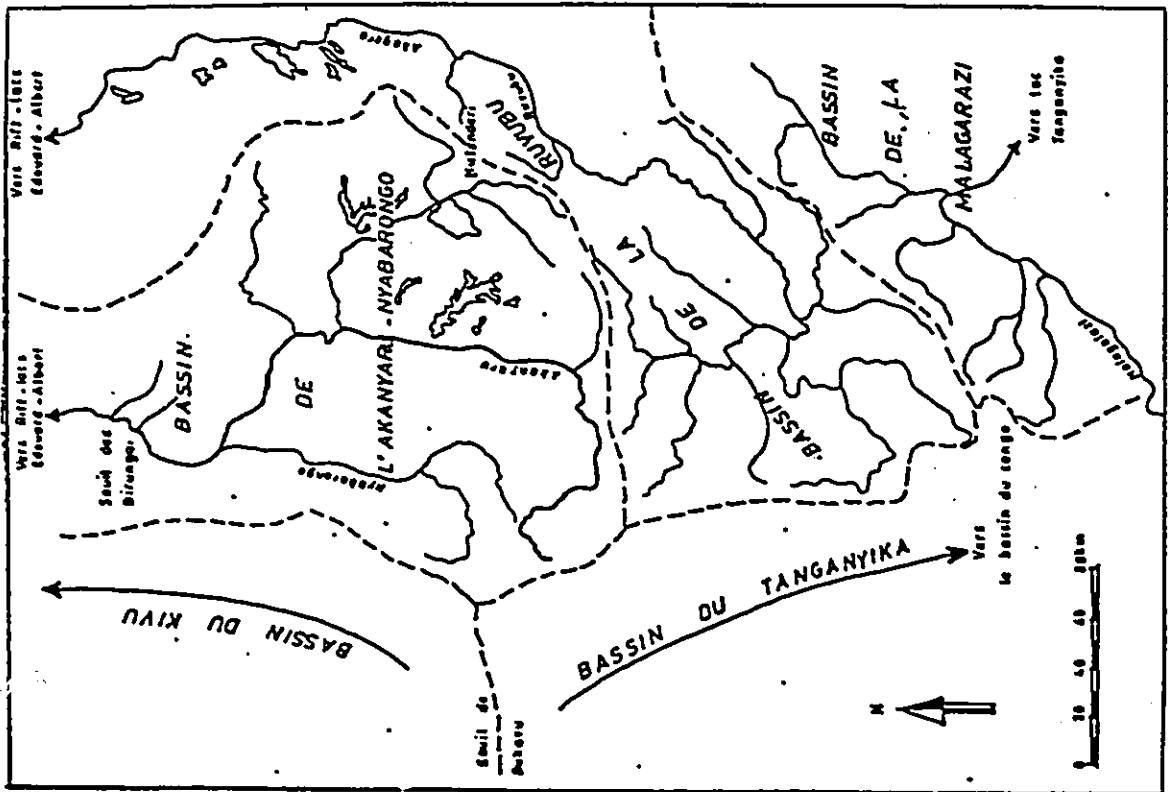


FIG 3.3 : Paléo-drainage



Finalement, les coulées successives des laves forceront la rivière Mukungwa à emprunter un col étroit dans lequel elle a creusé son cours épigénique. L'enfoncement par rapport à la surface topographique ancienne est d'environ 20 m. (Motor-Columbus et al., 1987).

D'autres constatations faites dans le bassin versant de la rivière Cyeru, tributaire du lac Bulera, tendent également à appuyer l'hypothèse de la réorganisation du réseau hydrographique dans la région. Une étude sur l'organisation du drainage dans le sous-bassin Est de la Cyeru (figure 3.4), permet en effet de constater que la "Nyirabirande aurait été refoulée lors de la surrection de la chaîne des Virunga (Bugiruwenda et al., 1987).

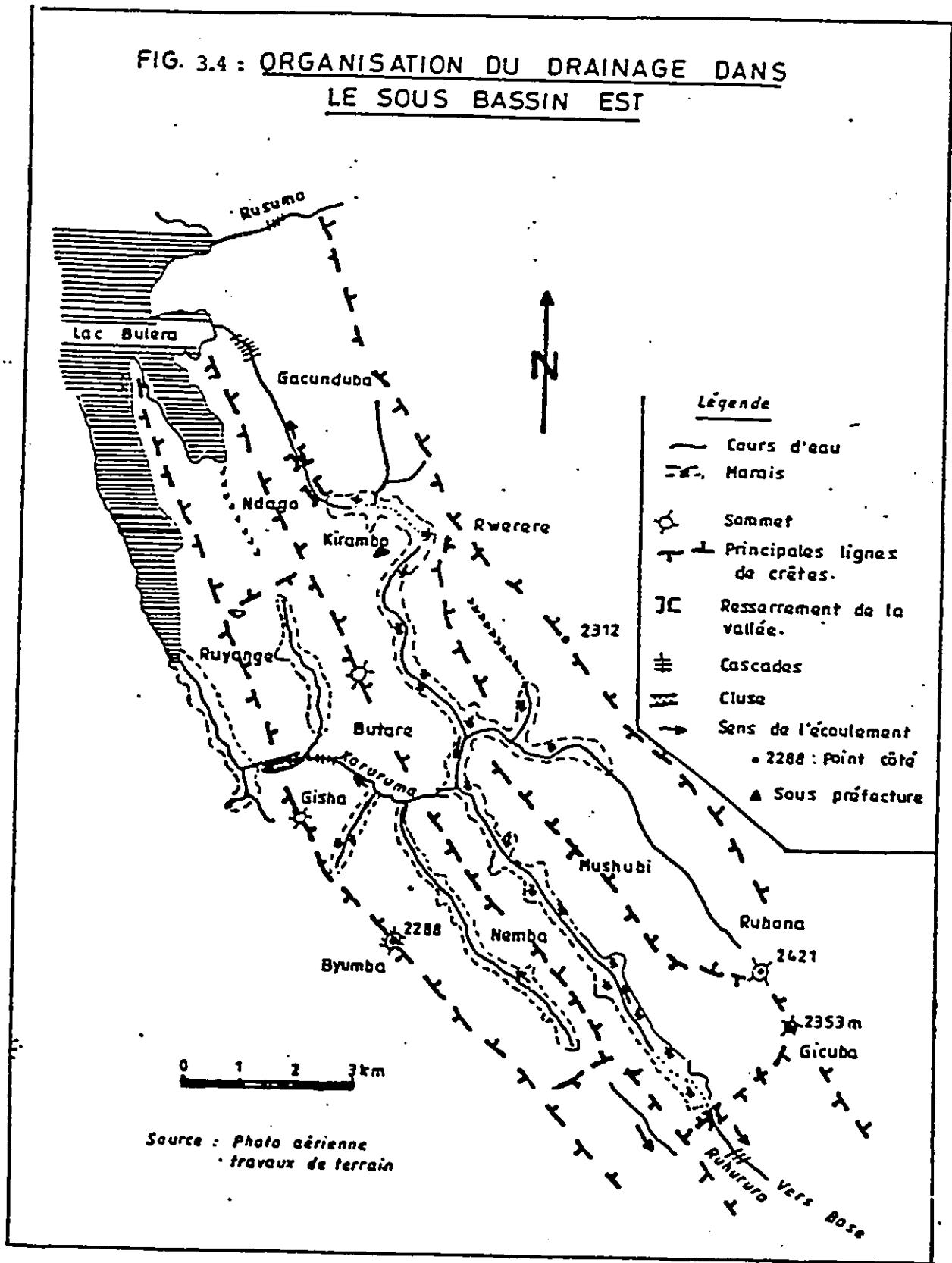
### 3.2.2 Réseau hydrographique actuel

Compte tenu de la complexité du drainage de la rivière Mukungwa, le bassin versant a été divisé en quatre sous-bassins distincts.

- 1) Cuvette Rugezi Au nord-est, se situe le marais de Rugezi, à une altitude de 2.050 m. Cette zone humide et complexe forme une cuvette elliptique de près de 30 km de long, ceinturée de crêtes quartzitiques. Le marais lui-même couvre une superficie de 7.000 ha et draine un bassin versant trois fois plus grand (Tableau 3.1).

Le marais repose dans un synclinarium fermé traversé par une grande faille de la famille de Rulindo. Le bassin versant du Rugezi est constitué par des sédiments Précambriens métamorphisés du Burundien et formés de roches pélitiques (phyllades, micaschistes, schistes métamorphiques) et par des roches arénacées et conglomératiques diverses (quartzites, conglomérats avec des intercalations minces ou lenticulaires de roches pélitiques ou arénacées).

FIG. 3.4 : ORGANISATION DU DRAINAGE DANS  
LE SOUS BASSIN EST



SOURCE : Bugiruwenda, J.B. UNR 1987

Le marais de Rugezi forme ainsi une vaste tourbière qui occupe le fond d'une vallée en V encadrée de collines dont les versants sont caractérisés par des pentes pouvant atteindre de 30 à 45 °.

La tourbière orientée Sud-Est/Nord-Ouest s'étend sur près de 30 km de longueur avec une largeur moyenne de 500 m vers l'aval et 2 km vers l'amont où elle se divise en 2 branches.

La pente moyenne longitudinale du marais est de l'ordre de 0,6 o/oo mais paraît plus accusée vers l'aval à partir du dernier kilomètre avant les chutes. A cet endroit, la vallée est barrée par un seuil en diabase s'inclinant vers le marais, et servant partiellement de déversoir naturel.

Les eaux du marais, très acides (pH = 4,5 à 5,5) se jettent dans le lac Bulera par une série de chutes d'environ 200 m à Rusumo.

Jusqu'en mai '87, un déversement amont se manifestait également au niveau de la branche Est de la tourbière (Hondo) vers l'ancienne propriété Fels en direction de la vallée de la Mulindi (déviation Fels).

Egalement vers l'amont, la branche Ouest de la tourbière est limitée sur un front de 2 km par un seuil étroit de 200 m de large. Ce seuil qui domine la tourbière d'environ 40 m, présente sur le versant opposé une pente abrupte vers les vallées affluentes du Giterere situées à quelques centaines de mètres en contrebas.

La vallée présente l'aspect d'une immense prairie flottante couverte de roseaux et de joncs, avec un îlot de cyperus papyrus vers l'aval près des chutes.



TABLEAU 3.1

CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS: SOUS-BASSIN RUGEZI

SECTION	SUPERFICIE (HECTARES)		
	MARAIS	VERSANTS	TOTAL
<u>Exutoire Rusumo</u>			
- Rugezi	4743	6774	11517
- Kamiranzovu	652	2592	3244
Sous-total	5395	9366	14761
Exutoire-Fels*	1582	3082	4664
TOTAL	6977	12448	19426

\* L'exutoire Fels a été bloqué en mai 1987.

- Précipitation annuelle moyenne (d'après la carte des isohyètes fig. 4.4)

$$P < 1200 \text{ mm} : S_1 = 113 \text{ km}^2$$

$$P_1 = 1160 \text{ mm}$$

$$1200 \leq P \leq 1300 \text{ mm} : S_2 = 39,4 \text{ km}^2$$

$$P_2 = 1250 \text{ mm}$$

$$P \geq 1300 \text{ mm} : S_3 = 41,7 \text{ km}^2$$

$$P_3 = 1330 \text{ mm}$$

$P_a = 1214,7 \text{ mm}$
---------------------------

- altitude moyenne : 2100 m
- altitude minimale : 2050 m
- altitude maximale : 2504 m

La partie amont est occupée plus particulièrement par un tapis végétal flottant de mousses (sphagnum) et de petites fougères (Erica). Dans la partie axiale de la vallée, une graminée (Miscanthidium Violaceum) ainsi que des plantes aquatiques (Nymphaea) flottent sur l'eau dont la profondeur est de l'ordre de 4 m. Sous cette eau se trouve de la tourbe fibreuse constituée par des débris végétaux, très lâches, dont la forme est conservée (Scet/Coop, 1970).

Le marais comprend une zone axiale soulignée par la présence d'un cours d'eau sinueux, creusé dans la tourbe, discontinu, surtout visible dans la partie médiane et aval de la tourbière. Les bordures du marais forment de nombreuses digitations qui correspondent à l'emplacement d'anciennes vallées affluentes.

Les bordures immédiates du marais Rugezi et une partie des vallées affluentes et des anses sont seules cultivées par les habitants des rives. Il s'agit de cultures en billons séparés par des fossés. Le rabattement de la nappe est de l'ordre de 0,80 m. Périodiquement le sol tourbeux des billons est travaillé et les fossés sont déplacés environ tous les 2 ans.

La branche Nord du marais, communément appelée marais Kamiranzovu est occupée en grande partie par des cultures industrielles d'exportation (Projet Sources du Nil). Un système de drainage composé d'un fossé central et de bras transversaux secondaires permet de rabattre la nappe à environ 1 mètre de profondeur et de canaliser les eaux de ruissellement provenant des collines avoisinantes vers l'exutoire Rusumo.

## 2) Zone des Lacs Bulera et Ruhondo

Le bassin des lacs Bulera et Ruhondo présente la seconde grande unité du système hydrologique de la Mukungwa. (Voir Tableaux 3.2, 3.3).

TABLEAU 3.2

CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS: SOUS-BASSIN LAC BULERA

SECTION	SUPERFICIE km.ca.
Laves (excluant cyanika)**	41,1
Massif (socle)	
- Rivière Cyeru	101,6
- Rivière Kabaga	32,6
- Versants du Lac Bulera	52,1
- Iles du Lac Bulera	2,2
Sous-total	188,5
Lac Bulera (excluant les iles) cote 1862	45,4
Sous-bassin Rugezi (voir tableau 3.1)	193,3
<b>SUPERFICIE TOTALE</b>	<b>468,3 km.ca.</b>
* Altitude : moyenne 2180 m	Précipitation annuelle = 1243 mm
: minimale 1860 m	
: maximale 4127 m	

Notes: \* : Excluant les sous-bassins Bulera et Rugezi.

\*\* : Nous avons retranché 25 km<sup>2</sup> de superficie au sous-bassin normalement utilisé par d'autres. Cette superficie se draine vers le lac Mugisha en Ouganda dont l'exutoire souterrain n'est pas connu. La précipitation annuelle moyenne sur cette superficie est de 1505 mm/an.

TABLEAU 3.3

CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS: SOUS BASSIN LAC RUHONDO

SECTION	SUPERFICIE km.ca.
Laves	89
Bassin direct (incluant iles)	51,7
Lac Ruhondo cote 1764	25,7
Sous-bassins Bulera et Rugezi	468,3
<b>SUPERFICIE TOTALE</b>	<b>634,7 km.ca.</b>
* Altitude : moyenne 1950 m	Précipitation annuelle = 1295 mm
: minimale 1759 m	
: maximale 4127 m	

Notes: \* : Excluant les sous-bassins Bulera et Rugezi.

Formés suite aux éruptions des Virunga, ces lacs inondent les vallées d'anciens cours d'eau.

Dans le cas du lac Bulera, toute la vallée a été inondée sous une couche d'eau de 173 m, formant ainsi le plus grand lac intérieur du Rwanda, avec une superficie de 47.6 km<sup>2</sup>. Une cassure dans la crête quartzitique qui le borde à l'ouest a créé une voie de sortie des eaux vers le lac Ruhondo, situé 100 m plus bas. Le lac Ruhondo, d'une superficie de 2598 ha et profond de 88 mètres, donne à son tour naissance à la rivière Mukungwa via une brèche similaire dans les rives occidentales.

Les deux lacs drainent une région d'environ 635 km<sup>2</sup>. Ils sont alimentés principalement par les rivières Rugezi et Cyeru, mais aussi par des infiltrations souterraines en provenance de la zone des laves et par le ruissellement des collines avoisinantes. Ce réseau de surface n'est pas très dense et consiste principalement en des torrents saisonniers.

### 3) Zone des Virunga (laves)

Les deux dernières sous-unités du bassin de la Mukungwa se situent à l'ouest de la région des lacs et alimentent directement la rivière. Au nord-ouest, la forêt des Virunga, détremmée par les pluies, sert de château d'eau à la région. Plus de 220 millions de mètres cubes d'eau tombent annuellement sur les 125 km<sup>2</sup> du parc dont la majeure partie, absorbée par le sol et la végétation, est lentement relâchée tout au long de l'année.

Cette région se caractérise donc par l'absence de réseau hydrographique permanent. Cette anomalie provient du sol volcanique souvent très perméable et permettant une rapide infiltration. A l'occasion des fortes pluies, l'eau dévale à travers toute la région sous forme de brefs torrents destructifs.

TABLEAU 3.4

CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS: SOUS-BASSIN MUKUNGWA II

SECTION	SUPERFICIE km.ca.
Ruvumu et Mukinga	133
Susa	174
Mutobo*	182,3
Sous-bassins Ruhondo, Bulera, Rugezi	634,7
<b>SUPERFICIE TOTALE</b>	<b>1124 km.ca.</b>

Précipitation annuelle moyenne \*\* : P = 1580,3 mm/an

Notes: \* : La rivière disparaît ou est absorbée par un réseau de galeries liées aux coulées de laves; elle alimente le réservoir de rétention constitué par les laves.

\*\* : Excluant les sous-bassins Ruhondo, Bulera et Rugezi.

L'eau s'écoule en fait sous terre jusqu'au lit de la Mukungwa ou bien réapparaît en surface sous forme de multiples sources le long de la ligne de contact entre la lave et les strates de roches dures du sud. Dans la partie sud-ouest du bassin versant, plusieurs petits lacs (Karago, Bihinga, Nyirakigugu, et Cyunyu) se sont formés dans des dépressions le long de cette ligne de contact (Katarawa, 1980; Weber et al., 1987).

Notons également que certaines de ces sources, comme par exemple la Rubindi et la Mutobo en commune de Mukingo, peuvent déborder jusqu'à 300 l/sec.

4) Zone de la basse Mukungwa

La quatrième et dernière sous-unité du bassin de la Mukungwa se caractérise par un réseau dense de ruisseaux et rivières permanent qui draine les collines escarpées du sud-ouest de Ruhengeri et d'une partie de Gisenyi. Vers l'ouest, les sources qui naissent en hauteur, sur la Crête Zaïre-Nil se rejoignent en de nombreux ruisseaux qui descendent près de 1.000 m sur les pentes abruptes et vont se jeter dans la vallée de la basse Mukungwa. La dénivellation est moins sévère du côté des arêtes quartzitiques de l'est. L'eau coule dans une succession de vallées échelonnées, puis traverse de larges plaines alluviales avant de rejoindre la Mukungwa. En plus de ces ruisseaux, cette région est aussi riche en sources. Dans la seule commune de Nyamutera (57 km<sup>2</sup>), l'auteur en a recensé plus de 500.

Le système de la Mukungwa s'achève au confluent de la rivière Nyabarongo.

#### 4.0 HYDROMÉTÉOROLOGIE

Le terme "hydrométéorologie" utilisé dans le présent document réfère à une approche des phénomènes météorologiques qui doivent être pris en compte dans l'établissement du bilan hydrique.

#### 4.1 Climatologie de la zone d'étude

##### Bilan des radiations

Le cycle global de l'eau est étroitement lié aux phénomènes de transformation des radiations solaires. En d'autres mots, le cycle global de l'eau joue un rôle primordial sur la balance énergétique de l'atmosphère et de la surface du globe (Budyko et al., 1978). Ainsi les régions situées à l'équateur sont caractérisées par une balance de radiation au sol très élevée tout au long de l'année (Griffiths, 1972). Le tableau 4.1 montre d'ailleurs les variations de la balance de radiation à différentes Latitudes. Dans ce tableau, R=Balance de Radiation, T=Transfert de chaleur de la surface vers l'atmosphère, Fo= Redistribution de la chaleur par les courants marins, Ra= Balance de Radiation de l'atmosphère, Lr= Apport de chaleur provenant de la condensation dans l'atmosphère.

Dans la pratique, les valeurs élevées que l'on retrouve en zone équatoriale se traduisent suivant la saison par une évaporation et une évapotranspiration élevées (Budyko et al., 1978; Lockwood, 1978; Wiesner, 1970). Des phénomènes de turbulence dans les premières couches de l'atmosphère conduisent également à des flux verticaux de vapeur d'eau favorisant l'instabilité convective de l'air. Cette instabilité est à l'origine d'orages fréquents durant les saisons pluvieuses.

Tableau 4.1

Balance de la chaleur à la surface du globe (Kcal/cm<sup>2</sup>/an)

Degré de latitude	Continents			Océan				Planète				Atmosphère	
	R	LE	T	R	LE	T	F	R	LE	T	F	R	Lr
70-60 N.	20	16	4	22	26	23	-27	21	19	10	- 8	-77	34
60-50	30	23	7	40	47	19	-26	34	33	12	-11	-66	51
50-40	45	25	20	63	65	15	-17	54	44	18	- 8	-66	51
40-30	60	23	37	90	96	15	-21	77	65	24	-12	-76	46
30-20	69	19	50	111	106	7	- 2	95	73	23	- 1	-90	39
20-10	71	32	39	123	117	7	- 1	109	94	15	0	-91	70
10- 0	72	57	15	126	106	7	13	114	95	9	10	-84	128
0-10 S.	72	61	11	128	97	6	25	115	88	7	20	-81	101
10-20	73	45	28	123	113	9	1	111	98	13	0	-84	74
20-30	70	28	42	110	108	11	- 9	101	90	18	- 7	-81	61
30-40	62	29	33	93	86	11	- 4	89	79	14	- 4	-78	68
40-50	41	22	19	72	48	4	20	71	47	4	20	-70	77
50-60	31	22	9	45	34	9	2	45	34	9	2	-63	89
Global	49	27	22	91	82	9	0	79	67	12	0	-79	67

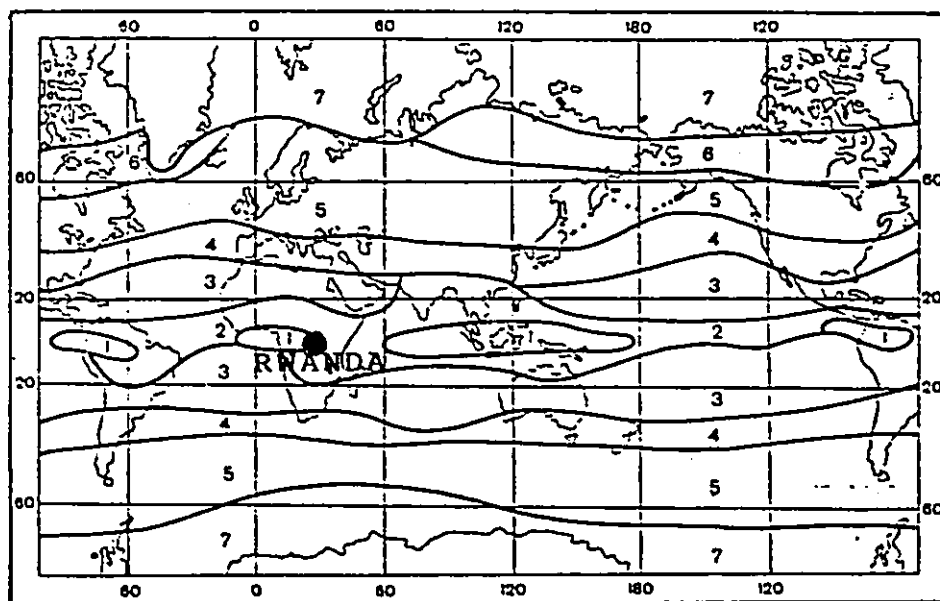
Source: Budyko et al., 1978.

Circulation atmosphérique

Evidemment l'évaporation au dessus des continents dépend largement des régimes de précipitation liés aux grands systèmes de circulation atmosphérique du globe.

Figure 4.1 Zones Climatiques de la terre (d'après Budyko et al., 1978)

- |                |                    |
|----------------|--------------------|
| 1 : Equatorial | 2 : Sub-équatorial |
| 3 : Tropical   | 4 : Sub-tropical   |
| 5 : Tempéré    | 6 : Sub-polaire    |
| 7 : Polaire    |                    |



Comme on peut le constater à la figure 4.1, le Rwanda se situe en bordure des zones équatoriale et sub-équatoriale. Ces zones se caractérisent par des vents faibles et des précipitations réparties assez uniformément au cours de l'année avec une tendance à des maxima à l'automne et au printemps (Fig 4.2).

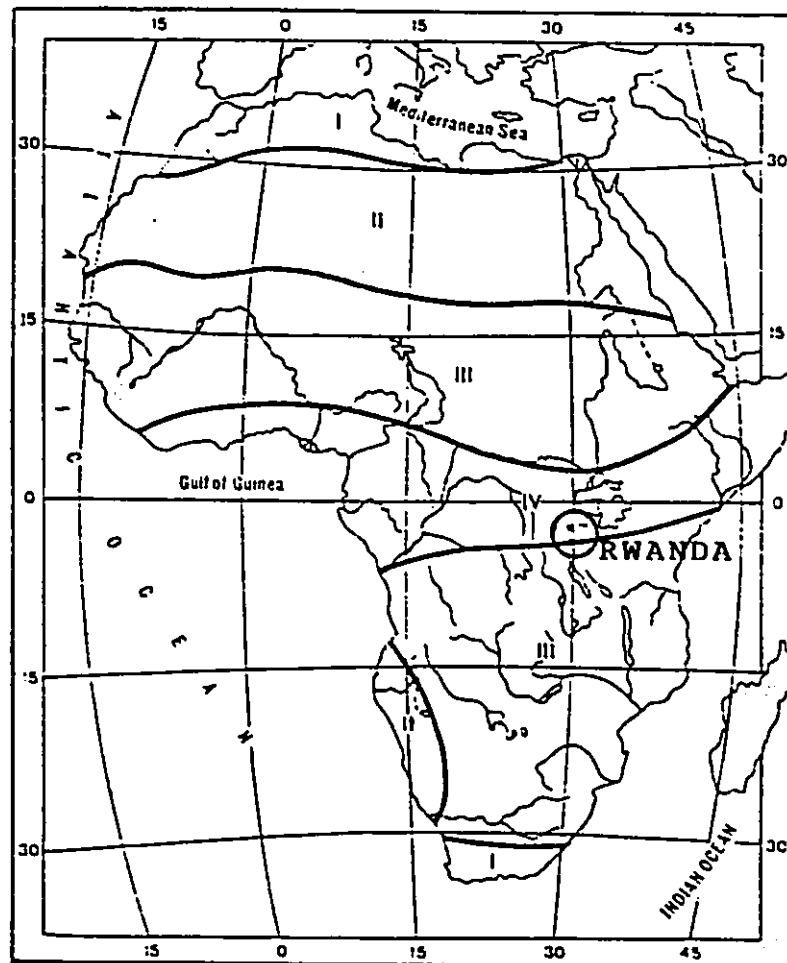
Les climatologues décrivent souvent cette partie du globe comme étant la Zone Intertropicale de Convergence des Vents Alizés (ITZC). Dans la région équatoriale africaine, les vents dominants soufflent de l'Est depuis l'océan Indien. Progressivement la vitesse des vents de haute altitude diminue au dessus du continent, créant ainsi les conditions idéales pour des orages de convection, spécialement durant les périodes les plus chaudes, de la journée.

Par contre, durant l'hiver austral, l'ITZC se déplace vers le Nord provoquant alors une saison sèche de trois mois.

Notons de plus que les hautes montagnes de la région à l'étude donnent lieu à des phénomènes de type orographique caractérisés par des précipitations plus abondantes sur les versants Est des montagnes et, en contraste, une diminution à l'Ouest (föhn).

Figure 4.2 Types de variation des précipitations annuelles

- |     |                 |    |  |
|-----|-----------------|----|--|
| I   | : Sub-tropicale | II | : Saharienne   |
| III | : Tropicale     | IV | : Equatoriale avec deux maxima,<br>à l'automne et au printemps |



## 4.2 Précipitations

Comme on l'a vu précédemment, les précipitations de la zone à l'étude sont de type convectif compliqué par des phénomènes orographiques. L'abondance et la régularité des précipitations dans les régions montagneuses de la zone pré-équatoriale et de la côte de l'Afrique de l'Est sont en grande partie dues à la forte humidité des masses d'air et à leurs déplacements depuis l'océan Indien.

### 4.2.1 Réseau pluviométrique

Les données de précipitations ont été recueillies auprès du service Météorologique du MINAGRI de même qu'aux stations de Ruhengeri-aéroport, de l'Isar-Rwerere et à Ntaruka.

Sur l'ensemble du bassin versant que nous intéresse (1125 km<sup>2</sup>), on retrouve dix-huit stations pluviométriques. Les relevés sont fait quotidiennement à partir de pluviomètres standards de 1 mètre de hauteur de marque "Wilk Pambrecht Gottingen, type 1507 a" ou l'équivalent.

Par contre, on peut remarquer en analysant la figure 3.1a, que l'emplacement des stations pluviométriques n'est pas établi dans une perspective d'ensemble. En fait, les stations sont souvent localisées dans des paroisses ou sur des fermes expérimentales. Les considérations d'ordre hydrologique ne sont donc pas privilégiées dans le choix des sites. Ainsi par exemple, le bassin Rugezi possède 3 stations de mesures, mais elles sont toutes localisées à l'amont du bassin, tandis qu'à l'exutoire où se trouve le limnimètre, aucune mesure de précipitation n'est faite.

Or, toujours suivant l'O.M.M., pour chaque limnimètre installé il est recommandé d'avoir au moins deux pluviomètres, l'un à l'exutoire et l'autre à l'extrémité du bassin versant (O.M.M., 1974). On voit ici que même si nous avons un nombre suffisant de points de mesure, leur répartition n'est pas adéquate.

Dans les régions montagneuses, on recommande également que les stations pluviométriques soient réparties par tranche d'altitude de 500 mètres et avec une densité minimale de 1 station par 100 @ 250 km<sup>2</sup>. Comme on peut le constater ici, la densité moyenne dans le bassin de la rivière Mukungwa est de l'ordre de 1 station par 60 km<sup>2</sup>, ce qui satisfait au critère de densité minimale. Par contre quand on regarde le tableau 4.2 montrant la répartition des stations par tranche d'altitude on voit tout de suite qu'en altitude le réseau est déficient.

Tableau 4.2

REPARTITION DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES PAR TRANCHE D'ALTITUDE

ALTITUDE m	SUPERFICIE %	STATIONS ACTUELLES	STATIONS OPTIMALES
> 3500	1	0	1
3000 @ 3500	3	1	1
2500 @ 3000	11	0	2*
2000 @ 2500	43	7	7
< 2000	42	7	7
		17	17

- \* Pour satisfaire aux exigences de l'O.M.M. on pourrait ajouter les stations suivantes: 1 station à la crête Zaire - Nil.  
1 station dans le parc des volcans.

Finalement on peut conclure que le réseau de pluviométrie actuellement en place au Rwanda fournit un certain nombre d'informations de base pour une étude hydrologique mais qu'il importe de l'optimiser dans le but de mieux prévoir et comprendre dans l'avenir les phénomènes hydrologiques qui caractérisent le bassin de la rivière Mukungwa.

#### 4.2.2 Analyse des données de précipitation

A partir des données brutes de l'annexe A, il a été possible de dresser le tableau 4.3 listant les précipitations annuelles mesurées à diverses stations de mesures réparties sur le bassin versant (figure 3.1a). Compte tenu des moyens restreints dont dispose le Rwanda pour compiler et traiter ces données, il est essentiel dans un premier temps d'en vérifier la consistance.

La méthode des courbes comparatives des valeurs cumulées a été retenue pour cette vérification, mais pour ce faire il a d'abord fallu procéder à l'estimation des données manquantes.

##### 4.2.1.1 Estimation des données manquantes

Plusieurs méthodes sont employées pour estimer des valeurs manquantes: la méthode du rapport normal, la régression linéaire multiple et l'interprétation des données à partir de stations voisines. Notons qu'une analyse de régression linéaire entre altitude et précipitation a donné des résultats peu concluants avec  $r^2 = 0,34$ . (Annexe A).

##### Méthode du rapport normal

Suivant cette méthode, les valeurs manquantes sont estimées à partir des données de trois stations-index situées à proximité et à égale distance de la station dont les données sont manquantes. On utilise alors la relation suivante:

$$P_x = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{N_x \cdot P_a}{N_a} + \frac{N_x \cdot P_b}{N_b} + \frac{N_x \cdot P_c}{N_c} \right) \quad [4.1]$$

où  $P_x$  = précipitation manquante

$P_i$  = précipitation à la station  $i$  pour la période manquante

$N_i$  = précipitation normale à long terme à la station  $i$

$i = a, b$  ou  $c$ .

TABLEAU 4.3: PRECIPITATION ANNUELLE: Avant calcul des valeurs annuelles manquantes (mm.)

AN	RUB-P.	RWANK.	KINIGI	RUBUH.	RVE-M.	RVE-C.	NYARU.	KINONI	MUKIN.	BULERA	NEMBA	RUB-A.	KARIS.	MUSAM.	UNR
1928	1259														
1929	1222														
1930	1428														
1931	1126														
1932	1276														
1933	1136														
1934	1152														
1935	1127														
1936	1234														
1937	1393	1519													
1938	1207	1232													
1939	1081	1218													
1940	1257	1240													
1941	1292	1590													
1942	1366	1382													
1943	1161	1155													
1944	1069	1043													
1945	1141	1257	1441												
1946	1003	1274	1581												
1947	1615	1314	1667												
1948	1009	1040	1496												
1949	1110	1135	1484												
1950	1081	1169	1414												
1951	1579	2052													
1952	1015	1353	1472												
1953	1481	1353	1446												
1954	1304	1181	1732	1079											
1955	1409	1210	1596	1344											
1956	1320	1489	1690	1191											
1957	1254	1020	1710	1451											
1958	1261	1022	1795	1471											
1959	1218	1232	1627	1214	1077										
1960	1120		1401	797	878										
1961	1406		1704	962	1032	1112									
1962	1440	1172	1536	1104	1277	1191	1107								
1963	1801	1449	2130	1432	1368	1539	1499								
1964	1399	1342	1208	1398	1091	1130									
1965	1309	1293	1262	1445	1102	1246	1272	1146	1074						
1966	1345	1329	1431	1468	1011	1093	1142	1147	1264						
1967	1279	1102	1622	1833	1111	1250	1269	1144	1572						
1968	1453		1671	1734	1141		1102	1144	1436						
1969	1633	1026	1320	1405	968	1068	1179	1235	1142						
1970	1282		1527	1255	1111	1171	1211	1128	1176	967					
1971	1764	1537	1667	1302		1308	1305	1233	1424	1079	1350				
1972	1558		1726	1450	1393	1357	1227	1371	1317	1374	1501				
1973	1495	1104	1513	1424	1129	1157	1314	1110	1139	1095	1734				
1974	1679		1629	1297	1404	1371	1377		1340	1193	1850				
1975	1895	1388	1492		1496	1421	1334	1201	1309	1104	1545				
1976	1568			1054	1096	1163		947	1174	947	1372				
1977	1579			1401	1266	1410	1326	1183	1094	1022	1724				
1978	1601	1290		1262	1149	1221	1089	1165	1260	1198	1534	1334			
1979	1614	1373		1287	1150	1119		1152	1320	1103	1643	1283	2096		
1980	1665	1039		1258	1143	1170		1169	957	1212	1384	1260	1722		
1981	1201	1251		1277	1013	1194		1105	911	1106	1569	1201	2020		
1982				1396	1266	1352	1421		1162		1697	1393	2038		
1983	1244		1605	1298	1171	1212	1224		1197		1570	1244	2000	1308	
1984	1072	1005	1360		932	937	1169	1034	825		1416	1072	1673	1085	996
1985	1174	1270	1476	1170	1022	1045	1378	1234	1074		1385	1174		1102	1039
1986	1157	1288	1593	1150	1048	1040		1123	975	1105	1395	1157		1266	1012

SIGNIFICATION DES ABBREVIATIONS

	NO.²
RUB-P. :Rubengeri-préfecture	1
RWANK. :Rwankeri	2
KINIGI :Kinigi	3
RUBUH. :Rubunde	4
RVE-M. :Rverere-marais	5
RVE-C. :Rverere-colline	6
NYARU. :Nyaruka	7
KINONI :Kinoni	8
MUKIN. :Mukingo	9
BULERA :Bulera-lac	10
NEMBA :Nemba	11
RUB-A. :Rubengeri-aéroport	12
KARIS. :Karisoke	13
MUSAM. :Musanze	14
UNR :Nyakinama-UNR	15

² : le numéro correspond à l'emplacement de la station sur la fig.3.1a

Cette procédure n'est cependant valable que lorsqu'il existe une bonne corrélation entre les précipitations à chacun des sites considérés, sinon une seule station à proximité peut donner une estimation meilleure que la moyenne des trois (Gray et al., 1972).

A partir des données du tableau 4.3 donc, et en remplaçant les valeurs manquantes par la moyenne de l'échantillon, une matrice de corrélation entre les diverses stations a été dressée suivant la relation suivante suggérée par Haan (1977):

$$\underline{R} = \underline{z}' \cdot \underline{z} / (n-1) = [R_{i,j}] \quad (4.2)$$

où  $\underline{R}$  = matrice de corrélation des variables indépendantes

$$\underline{z} = [Z_{i,j}] = [(X_{i,j} - X_j) / S_j]$$

$\underline{z}'$  = matrice transposée de  $\underline{z}$

$X_j$  et  $S_j$  = moyenne et écart-type de la  $j^{\text{ième}}$  variable indépendante

$n$  = nombre d'observations

L'analyse de la matrice ainsi obtenue (tableau 4.4) nous montre que le remplacement des valeurs manquantes par la valeur moyenne de l'échantillon introduit un biais important pour les stations ayant très peu d'années d'observation: la corrélation de la station par rapport à elle-même dérive alors très rapidement de l'unité.

Pour compenser cette situation nous avons remplacé  $(n-1)$  par  $N_j$  dans l'équation 4.2: nous obtenons alors la matrice du tableau 4.5 qui n'est cependant pas symétrique. Elle permet par contre de connaître le champ de variation des coefficients de corrélation. On voit par

TABLEAU 4.4: MATRICE DE CORRELATION - PREC. ANNUELLES. 1959 à 1986  
(Valeurs manquantes estimées par la moyenne)  
 $Z' = Z / (N-1)$

	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RWE-M.	RWE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIN.	BULERA	NEMBA	RUH-A.	KARIS.	MUSAN.	UNR
RUH-P.	1.00														
RWANK.	0.28	0.67													
KINIGI	0.31	0.24	0.78												
RUHUN.	0.18	-0.06	0.08	0.96											
RWE-M.	0.70	0.28	0.42	0.26	1.00										
RWE-C.	0.59	0.37	0.47	0.23	0.77	0.93									
NTARU.	0.23	0.22	0.29	-0.06	0.35	0.44	0.70								
KINONI	0.26	0.15	0.11	0.13	0.31	0.28	0.07	0.70							
MUKIN.	0.36	0.28	0.23	0.36	0.34	0.37	-0.04	0.26	0.81						
BULERA	0.04	-0.07	0.10	0.08	0.17	0.06	-0.06	0.34	0.04	0.48					
NEMBA	0.14	-0.03	0.02	0.16	0.30	0.30	0.16	0.02	0.14	-0.02	0.59				
RUH-A.	0.25	0.11	0.06	0.06	0.20	0.26	0.06	0.11	0.22	0.02	0.18	0.33			
KARIS.	0.04	0.19	0.06	0.01	0.09	0.13	0.88	0.07	0.17	-0.05	0.16	0.15	0.22		
MUSAN.	0.04	0.10	0.07	-0.01	0.08	0.09	0.02	0.06	0.09	0.01	0.04	0.09	0.10	0.15	
UNR	0.02	0.08	0.02	-0.03	0.02	0.03	0.09	0.11	0.06	-0.00	-0.01	0.05	0.06	0.04	0.11

TABLEAU 4.5: MATRICE DE CORRELATION - PREC. ANNUELLES. 1959 à 1986  
(Valeurs manquantes estimées par la moyenne)  
 $Z' = Z / N_j$

	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RWE-M.	RWE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIN.	BULERA	NEMBA	RUH-A.	KARIS.	MUSAN.	UNR
RUH-P.	1.00	0.42	0.40	0.18	0.70	0.63	0.33	0.37	0.44	0.09	0.23	0.75	0.18	0.35	0.18
RWANK.	0.28	1.00	0.30	-0.07	0.28	0.39	0.32	0.21	0.34	-0.14	-0.04	0.34	0.88	0.65	0.68
KINIGI	0.31	0.35	1.00	0.09	0.42	0.51	0.41	0.16	0.29	0.20	0.04	0.19	0.26	0.50	0.18
RUHUN.	0.18	-0.09	0.11	1.00	0.26	0.25	-0.08	0.18	0.44	0.17	0.28	0.17	0.06	-0.09	-0.25
RWE-M.	0.70	0.41	0.54	0.27	1.00	0.83	0.50	0.44	0.42	0.35	0.50	0.61	0.40	0.54	0.22
RWE-C.	0.59	0.55	0.61	0.24	0.77	1.00	0.63	0.40	0.45	0.12	0.50	0.77	0.56	0.63	0.30
NTARU.	0.23	0.34	0.37	-0.06	0.35	0.48	1.00	0.09	-0.04	-0.12	0.27	0.18	0.37	0.13	0.80
KINONI	0.26	0.22	0.15	0.13	0.31	0.30	0.09	1.00	0.32	0.71	0.04	0.32	0.30	0.43	1.03
MUKIN.	0.36	0.42	0.30	0.37	0.34	0.40	-0.05	0.37	1.00	0.08	0.24	0.66	0.76	0.62	0.56
BULERA	0.04	-0.10	0.12	0.09	0.17	0.06	-0.08	0.49	0.05	1.00	-0.03	0.05	-0.23	0.09	-0.03
NEMBA	0.14	-0.04	0.03	0.17	0.30	0.32	0.23	0.03	0.18	-0.04	1.00	0.53	0.70	0.29	-0.08
RUH-A.	0.25	0.17	0.08	0.06	0.20	0.28	0.08	0.15	0.27	0.03	0.30	1.00	0.66	0.59	0.43
KARIS.	0.04	0.29	0.08	0.01	0.09	0.14	0.12	0.09	0.21	-0.10	0.26	0.44	1.00	0.70	0.58
MUSAN.	0.04	0.14	0.10	-0.01	0.08	0.10	0.03	0.09	0.11	0.03	0.07	0.26	0.46	1.00	0.37
UNR	0.02	0.11	0.03	-0.03	0.02	0.04	0.13	0.16	0.08	-0.01	-0.02	0.14	0.29	0.28	1.00

exemple que le coefficient de corrélation entre les données de la station Ruhengeri-préfecture (RUH-P) et Rwerere-colline (RWE-C) varie entre 0,63 et 0,59. On constate également que plus l'écart est grand entre la taille des observations d'une station et une autre, plus le coefficient de corrélation variera (exemple Ruhengeri-Préfecture et Ruhengeri-Aréo 0,75 Cr 0,25). Pour contourner ce problème, on peut réduire la taille des échantillons de façon à minimiser l'effet des années manquantes.

Rappelons cependant que, toujours selon (1977), le nombre d'observations sur lequel on procède à une analyse de ce type doit être de trois à quatre fois supérieur au nombre de stations utilisées, que ce soit pour une régression ou pour la détermination des valeur manquantes. Puisque que dans le cas de la méthode du rapport normal, on utilise 3 stations-index, le nombre d'années d'échantillon doit donc être de l'ordre de 10 à 15 ans minimum. Cette contrainte, alliée à celle de l'équilibre géographique que nous a amené à conclure, en regardant le tableau 4.5, que l'utilisation de la méthode du rapport normal n'est pas justifiée pour les raisons suivantes:

- L'impossibilité de dégager des ensembles de 4 stations dont les données sont suffisamment corrélées;
- La distance séparant les station n'est pas uniforme.
- Variations importantes et irrégulières des coefficients de corrélation.

#### **Méthode par régression multiple**

Suivant Linsley et al., (1982), l'estimation des valeurs manquantes peut également se faire en utilisant une régression multiple de la forme:

$$P_x = a + b_a P_a + b_b P_b + b_c P_c \quad [4.3]$$

où  $a \approx 0$

$$b_j \approx N_x / (3 \cdot N_j)$$

En s'appuyant sur cette hypothèse et sur le fait que la première étape de toute analyse de régression en hydrologie doit reposer sur une analyse rationnelle du problème, des essais ont été faits sur un certain nombre de stations. Dans tous les cas, les coefficients obtenus s'éloignent substantiellement des valeurs décrites plus haut.

Prenons le cas illustré au tableau 4.6. Nous avons tenté de générer les valeurs manquantes de la station Rwankeri pour les années 1968, 70, 72 et 74. L'estimation des valeurs manquantes s'est d'abord faite suivant la méthode du rapport normal, à partir des données des stations de Rwerere-colline et marais ainsi que Ruhengeri-préfecture, ce choix étant basé sur la matrice de corrélation du tableau 4.5.

Par la suite nous avons procédé à une régression multiple qui a donné le résultat suivant:

$$P_x = 0,82 \cdot P_1 + 0,08 \cdot P_2 + 0,12 \cdot P_3$$

où :  $P_x$  = Précipitation annuelle cherchée à Rwankeri

$P_1$  = Précipitation annuelle correspondante à  
Rwerere-colline

$P_2$  = Précipitation annuelle correspondante à  
Rwerere-marais

$P_3$  = Précipitation annuelle correspondante à  
Ruhengeri-préfecture

TABLEAU 4.6: ESTIMATION DE VALEURS MANQUANTES PAR REGRESSION MULTIPLE

REGRESSION MULTIPLE DE RWANKERI EN FONCTION DE RWERERE ET RUHENGRI

Valeurs manquantes estimées par rapport normal.

AN	RWANK.	RWE-C.	RWE-M.	RUH-P.
1965	1293	1246	1102	1309
1966	1329	1093	1011	1345
1967	1102	1258	1111	1279
1968	1324	1211	1141	1453
1969	1026	1068	968	1633
1970	1168	1171	1111	1282
1971	1537	1308	1233	1764
1972	1420	1357	1393	1558
1973	1104	1157	1129	1495
1974	1530	1371	1404	1679
1975	1388	1421	1496	1895
MOY.	1293	1242	1191	1517

Regression Output:  
 Constant -32  
 Std Err of Y Est 145  
 R Squared 1  
 No. of Observations 11  
 Degrees of Freedom 7  
 X Coefficient(s) 0.8652 0.0505 0.1253  
 Std Err of Coef. 1.2471 0.9392 0.3084

Regression Output:  
 Constant 0  
 Std Err of Y Est 136  
 R Squared 1  
 No. of Observations 11.00  
 Degrees of Freedom 8.00

X Coefficient(s) 0.8189 0.0800 0.1191  
 Std Err of Coef. 0.5645 0.5906 0.2545

Valeurs manquantes estimées par regression

AN	RWANK.	RWE-C.	RWE-M.	RUH-P.
1965	1293	1246	1102	1309
1966	1329	1093	1011	1345
1967	1102	1258	1111	1279
1968	1256	1211	1141	1453
1969	1026	1068	968	1633
1970	1200	1171	1111	1282
1971	1537	1308	1233	1764
1972	1408	1357	1393	1558
1973	1104	1157	1129	1495
1974	1435	1371	1404	1679
1975	1388	1421	1496	1895
MOY.	1280	1242	1191	1517

Regression Output:  
 Constant 0  
 Std Err of Y Est 127  
 R Squared 0  
 No. of Observations 11  
 Degrees of Freedom 8  
 X Coefficient(s) 0.935 -0.064 0.129  
 Std Err of Coef. 0.529 0.553 0.238

=====  
 Conclusion: solution non satisfaisante  
 =====

Si nous comparons les coefficients  $b_i$  avec les valeurs de  $N_x/(3.N_i)$  nous obtenons que:

$b_i$	$N_x/(3.N_i)$
0,82	- 0,35
0,08	- 0,36
0,12	- 0,28

On voit donc ici que la méthode de la régression multiple s'éloigne d'une explication rationnelle des données générées pour les années manquantes.

Si, par la suite, les données manquantes sont quand même remplacées par la méthode de régression multiple, nous obtenons alors de nouveaux coefficients.

$b_i$	$N_i/(3.N_i)$
0,935	- 0,35
-0,064	- 0,36
0,13	- 0,28

On voit alors que l'on s'éloigne encore davantage des valeurs recherchées. Nous remarquons également que l'erreur standard sur les coefficients est très grande. Nous en avons conclu que la méthode n'était pas appropriée dans le cadre de la présente étude.

#### Méthode retenue: Station à proximité

Devant la difficulté d'obtenir une bonne corrélation entre un minimum de 3 stations de mesures, une autre approche a été privilégiée, soit l'utilisation des données d'une ou deux

stations sises à proximité l'une de l'autre et ayant une corrélation acceptable.

La relation retenue est de la forme:

$$P_x = \frac{P_x}{n} \cdot \sum_{i=1}^m (P_i / \bar{P}_i) \quad [4.4]$$

Cette relation est la même que dans la méthode du rapport normal, sauf que le nombre de stations retenues reste variable et dépend de la proximité et de la corrélation existant entre chaque station.

Tout d'abord l'analyse a porté sur les données des stations le plus anciennes (Ruhengeri, Kinigi et Rwankeri: 1945 @ 75). La corrélation de ces données (tableau 4.7) a montré que les données manquantes de la station Rwankeri pour les années 1951, 60 et 61 pouvaient être estimées à partir des données de Ruhengeri - Préfecture.

Tableau 4.7

Corrélation des précipitations annuelles : 1945 @ 1975

STATIONS	RUH-P.	RWANK.	KINIGI
RUH.P.	1,00		
RWANK	0.54	1,00	
KINIGI	0.34	0,33	1,00

Dans un deuxième temps, une matrice de corrélation entre 9 stations et couvrant la période de 65 à 75 a été préparée. (tableau 4.8)

Tableau 4.8

Corrélation des précipitations annuelles : 1965 @ 1975

STATIONS	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RWE-M.	RWE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIN
RUH-P.	1.00								
RWANK.	0.50	1.00							
KINIGI.	0.20	0.47	1.00						
RUHUN.	0.27	0.28	0.17	1.00					
RWE-M.	- 0.66	0.69	0.51	- 0.11	1.00				
RWE-C.	0.55	0.70	0.50	0.02	0.94	1.00			
NTARU.	0.47	0.33	0.10	- 0.31	0.61	0.65	1.00		
KINONI	0.53	0.50	0.39	- 0.26	0.56	0.51	0.18	1.00	
MUKIN.	0.11	0.32	0.74	0.58	0.29	0.42	0.00	0.16	1.00

A partir des résultats obtenus, les données manquantes pour la période de 1965 à 1970 ont été générées de la façon suivante:

Rwankeri : A partir de Rshengeri, Rwerere-Marais, Rwerere-Colline

Rwerere-Colline : A partir de Rwerere-Marais

Rwerere-Marais : A partir de Rwerere-Colline

Kinoni : A partir de Bulera

La processus itératif s'est ensuite continué en couvrant cette fois les périodes de 1970 à 1986, ce qui a donné la matrice de corrélation du tableau 4.9.

Tableau 4.9

Matrice de corrélation : précipitations annuelles 1970 @ 1978

STATION	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RWE-M.	RWE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIN.	BULERA	NEMBA
RUH-P.	1.00										
RWANK	0.57	1.00									
KINIGI	0.35	0.55	1.00								
RUHUN.	0.54	0.24	0.14	1.00							
RWE-M.	0.77	0.61	0.39	0.78	1.00						
RWE-C.	0.71	0.63	0.23	0.77	0.90	1.00					
NTARU.	0.35	0.31	0.11	0.45	0.52	0.46	1.00				
KINONI	0.38	0.50	0.37	0.56	0.71	0.62	0.54	1.00			
MUKIN.	0.71	0.71	0.80	0.46	0.72	0.62	0.36	0.55	1.00		
BULERA	0.13	0.14	0.25	0.32	0.36	0.24	0.13	0.72	0.19	1.00	
NEMBA	0.23	0.22	0.16	0.55	0.45	0.50	0.42	0.38	0.25	0.09	1.00

Par la suite, les données manquantes des années 70 à 78 ont été générées ainsi:

Rwankeri : à partir de Mukingo  
 Kinigi : " " " Mukingo  
 Ruhunde : " " " Rwerere Marais  
 Rwerere Marais : " " " Rwerere-Colline  
 Ntaruka : " " " Kinoni  
 Kinoni : " " " Bulera

Notons ici que les liens entre ces stations correspondent également aux réalités physiques du terrain. Finalement une dernière analyse sur la période de 1978 à 1986 et treize stations (Tableau 4.10) a permis d'associer les données de Kinoni avec Bulera, Nemba avec Ruhunde et Karisoke avec Rwankeri.

Tableau 4.10

Matrice de corrélation : précipitation annuelles 1978 @ 1986

STATION	RUH-P	RWANK	KINIGI	RUHUN	RWE-M	RWE-C	NTARU	KINONI	MUKIN	BULERA	NEMBA	RUH-A	KARIS
RUH-P	1.00												
RWANK	0.06	1.00											
KINIGI	0.17	0.70	1.00										
RUHUN	0.60	0.58	0.21	1.00									
RWE-M	0.68	0.48	0.43	0.88	1.00								
RWE-C	0.48	0.43	0.04	0.96	0.85	1.00							
NTARU	0.24	0.30	0.20	0.49	0.55	0.50	1.00						
KINONI	0.40	0.48	0.28	0.67	0.70	0.62	0.93	1.00					
MUKIN	0.50	0.79	0.82	0.65	0.72	0.46	0.42	0.58	1.00				
BULERA	0.42	0.27	0.06	0.53	0.57	0.51	0.66	0.81	0.25	1.00			
NEMBA	0.32	0.61	0.39	0.77	0.65	0.73	0.26	0.30	0.65	-0.04	1.00		
RUH-A	0.70	0.48	0.30	0.95	0.95	0.91	0.62	0.74	0.68	0.58	0.74	1.00	
KARIS	0.03	0.95	0.61	0.54	0.40	0.40	0.20	0.37	0.31	0.31	0.43	0.43	1.00

En remplaçant les valeurs manquantes dans le tableau 4.3, on obtient finalement le tableau 4.11, qui présente les précipitations annuelles complètes de 15 stations du bassin versant.

#### 4.2.3 Validité des données

La validité des données a ensuite été testée à partir des courbes comparatives des valeurs cumulées. Partant des données compilées au tableau 4.12 et en les portant en graphique (Annexe B), on a fait la constatation suivante:

- Des modifications importantes (relocalisation ou autres) sont survenues aux stations suivantes: Ntaruka, Kinigi et Ruhengeri-Préfecture.

TABLEAU 4.11: PRECIPITATION ANNUELLE:Après calcul des valeurs annuelles manquantes (mm.)

AN	RUE-P.	RVANK.	KINIGI	RUHUN.	RVE-N.	RVE-C.	NYARU.	KINOMI	MUKIM.	BULERA	WENBA	RUE-A.	KARIS.	MUSAN.	URR
1928	1259														
1929	1222														
1930	1428														
1931	1126														
1932	1276														
1933	1136														
1934	1152														
1935	1127														
1936	1234														
1937	1393	1519													
1938	1207	1232													
1939	1081	1218													
1940	1257	1240													
1941	1292	1590													
1942	1366	1382													
1943	1161	1155													
1944	1069	1083													
1945	1141	1257	1441												
1946	1003	1224	1581												
1947	1615	1314	1667												
1948	1009	1040	1496												
1949	1110	1135	1484												
1950	1081	1169	1414												
1951	1579	1439	2052												
1952	1015	1353	1472												
1953	1481	1353	1446												
1954	1304	1181	1732	1079											
1955	1409	1210	1596	1344											
1956	1320	1409	1690	1191											
1957	1254	1020	1710	1451											
1958	1261	1022	1795	1471											
1959	1218	1232	1627	1214	1077										
1960	1120	1022	1401	797	878										
1961	1406	1281	1704	962	1032	1112									
1962	1440	1172	1536	1104	1277	1191	1187								
1963	1801	1449	2130	1432	1368	1539	1499								
1964	1399	1342	1208	1398	1091	1138	1185								
1965	1309	1293	1262	1445	1102	1246	1272	1146	1074						
1966	1345	1329	1431	1468	1011	1093	1142	1147	1264						
1967	1279	1102	1622	1833	1111	1258	1269	1144	1572						
1968	1453	1324	1671	1734	1141	1211	1102	1144	1436						
1969	1633	1026	1320	1405	968	1068	1179	1235	1142						
1970	1282	1319	1527	1255	1111	1171	1211	1128	1176	967	1497				
1971	1764	1537	1667	1302	1270	1308	1305	1233	1424	1079	1350				
1972	1558	1478	1726	1450	1393	1357	1227	1371	1317	1374	1501				
1973	1495	1104	1513	1424	1129	1157	1314	1210	1119	1095	1734				
1974	1679	1503	1629	1297	1404	1371	1377	1237	1340	1193	1850				
1975	1895	1388	1492	1636	1496	1421	1334	1201	1309	1104	1545				
1976	1568	1317	1557	1054	1096	1163	1058	987	1174	987	1372				
1977	1579	1228	1452	1401	1266	1410	1268	1103	1094	1022	1724				
1978	1601	1290	1671	1262	1149	1221	1089	1165	1260	1198	1534	1334			
1979	1614	1373	1762	1287	1150	1119	1236	1152	1328	1103	1643	1283	2096		
1980	1665	1039	1269	1258	1143	1170	1254	1169	957	1212	1384	1260	1722		
1981	1201	1251	1209	1277	1013	1194	1185	1105	911	1106	1569	1281	2020		
1982	1426	1304	1542	1396	1266	1352	1421	1252	1162	1208	1697	1393	2038		
1983	1244	1342	1685	1298	1171	1212	1224	1158	1197	1117	1570	1244	2000	1388	
1984	1072	1005	1368	1019	932	937	1169	1074	825	998	1416	1072	1673	1885	996
1985	1174	1270	1476	1170	1022	1045	1378	1234	1074	1190	1385	1174	2004	1182	1039
1986	1157	1288	1593	1150	1048	1040	1204	1123	975	1185	1395	1157	2032	1266	1012

NOTE: pour la signification des abréviations, voir le tableau 4.3.

TABLEAU 4.12 : CONSISTANCE DES DONNEES DE PRECIPITATION  
VALEURS CUMULEES(1970-1986)

AN	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RVE-M.	RVE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIM.	BULERA	MEMBA	MOY.
1970	1282	1319	1527	1255	1111	1171	1211	1120	1176	967	1497	1240
1971	3046	2856	3194	2557	2381	2478	2515	2360	2600	2046	2847	2626
1972	4603	4334	4920	4007	3774	3836	3742	3731	3917	3420	4348	4057
1973	6098	5438	6433	5431	4903	4992	5056	4842	5036	4515	6082	5348
1974	7777	6941	8062	6728	6307	6363	6433	6078	6376	5708	7932	6791
1975	9672	8329	9554	8364	7803	7784	7767	7280	7685	6812	9477	8230
1976	11240	9646	11111	9418	8900	8947	8826	8267	8859	7799	10849	9442
1977	12819	10874	12563	10819	10165	10357	10094	9449	9953	8820	12573	10772
1978	14420	12164	14234	12081	11314	11578	11183	10614	11213	10018	14107	12084
1979	16034	13537	15996	13368	12464	12697	12418	11766	12541	11121	15750	13427
1980	17698	14576	17265	14626	13607	13867	13672	12935	13497	12333	17134	14656
1981	18899	15827	18474	15903	14620	15062	14857	14041	14409	13439	18703	15839
1982	20325	17131	20016	17299	15886	16414	16279	15293	15571	14647	20400	17205
1983	21569	18473	21621	18597	17057	17625	17503	16450	16768	15763	21970	18491
1984	22641	19478	22989	19616	17988	18562	18671	17484	17593	16761	23386	19561
1985	23815	20748	24465	20786	19011	19607	20050	18718	18666	17951	24771	20781
1986	24972	22036	26058	21936	20059	20647	21254	19841	19642	19135	26166	21977

TABLEAU 4.12a: CONSISTANCE DES DONNEES DE PRECIPITATION  
VALEURS CUMULEES(1979-1986)

AN	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUN.	RVE-M.	RVE-C.	NTARU.	KINONI	MUKIM.	BULERA	MEMBA	RUH-A.	KARIS.	MOY.
1979	1614	1373	1762	1287	1150	1119	1236	1152	1328	1103	1643	1283	2096	1396
1980	3278	2412	3031	2545	2293	2289	2489	2321	2285	2315	3027	2543	3818	2665
1981	4479	3663	4240	3821	3306	3483	3674	3426	3196	3421	4596	3744	5038	3914
1982	5905	4967	5782	5217	4572	4836	5096	4678	4358	4628	6293	5137	7876	5334
1983	7149	6309	7387	6516	5742	6047	6320	5836	5555	5745	7863	6381	9876	6671
1984	8221	7314	8755	7534	6674	6984	7489	6870	6380	6743	9279	7453	11549	7788
1985	9395	8584	10231	8704	7696	8029	8867	8104	7454	7933	10664	8627	13553	9065
1986	10552	9872	11824	9855	8744	9069	10071	9226	8429	9117	12059	9784	15585	10322

Vu la proximité des stations Kinoni et Ntaruka, il a été décidé de ne pas utiliser les données de la station Ntaruka pour dresser la carte des isohyètes.

Quant aux données de la station Kinigi, un facteur de correction de 1,12 a été appliqué aux valeurs annuelles enregistrées avant 1982.

Pour la station Ruhengeri-Préfecture, un facteur de correction de 0,82 a été utilisé pour les années antérieures à 1980.

Ces valeurs ont ainsi permis de dresser le tableau 4.13 montrant les données utilisées pour construire la carte des isohyètes.

#### **4.2.4 Préparation de la carte des isohyètes**

Partant des données de précipitations retenues plus haut, une carte des isohyètes a été dressée dans le but d'illustrer et de déterminer la distribution spatiale de la précipitation moyenne sur chaque sous-bassin à l'étude.

Le choix de la méthode des isohyètes s'appuie sur le fait que les méthodes comme celles de la moyenne arithmétique ou du polygone de Thiessen exigent d'une part une distribution représentative des stations de mesures, ce qui n'est évidemment pas le cas ici, et d'autre part une topographie relativement uniforme pour l'ensemble du bassin versant: ce n'est pas le cas non plus au Rwanda, reconnu comme "le pays des mille collines".

En terrain montagneux par contre, la méthode des isohyètes, celle du pourcentage normal ou encore la méthode hypsométrique sont mieux adaptées (Gray et al., 1972; Linsley et al., 1982). La méthode des isohyètes a cependant l'avantage de permettre à l'analyste d'appliquer toutes les informations dont il dispose, à savoir:

TABLEAU 4.13: DONNEES DE BASE POUR CARTE DES ISORIETES

PRECIPITATION ANNUELLE:Après calcul des valeurs annuelles manquantes (mm.)

AN	RUH-P.	RWANK.	KINIGI	RUHUM.	RWE-M.	RWE-C.	KINONI	MUKIN.	BULERA	MEMBA	RUH-A.	KARIS.	MUSAN.	UWR
1961	1153	1281	1908	962	1032	1112								
1962	1181	1172	1720	1104	1277	1191								
1963	1477	1449	2385	1432	1368	1539								
1964	1147	1342	1353	1398	1091	1138								
1965	1073	1293	1413	1445	1102	1246	1146	1074						
1966	1103	1329	1602	1468	1011	1093	1147	1264						
1967	1049	1102	1817	1833	1111	1258	1144	1572						
1968	1191	1324	1871	1734	1141	1211	1144	1436						
1969	1339	1026	1479	1405	968	1068	1235	1142						
1970	1051	1319	1711	1255	1111	1171	1128	1176	967	1497				
1971	1446	1537	1867	1302	1270	1308	1233	1424	1079	1350				
1972	1277	1478	1933	1450	1393	1357	1371	1317	1374	1501				
1973	1226	1104	1694	1424	1129	1157	1110	1119	1095	1734				
1974	1377	1503	1824	1297	1404	1371	1237	1340	1193	1850				
1975	1554	1388	1671	1636	1496	1421	1201	1309	1104	1545				
1976	1286	1317	1744	1054	1096	1163	987	1174	987	1372				
1977	1295	1228	1626	1401	1266	1410	1183	1094	1022	1724				
1978	1313	1290	1871	1262	1149	1221	1165	1260	1198	1534	1334			
1979	1323	1373	1973	1287	1150	1119	1152	1328	1103	1643	1283	2096		
1980	1365	1039	1422	1258	1143	1170	1169	957	1212	1384	1260	1722		
1981	1201	1251	1354	1277	1013	1194	1105	911	1106	1569	1201	2020		
1982	1426	1304	1542	1396	1266	1352	1252	1162	1208	1697	1393	2038		
1983	1244	1342	1605	1298	1171	1212	1158	1197	1117	1570	1244	2000	1308	
1984	1872	1005	1368	1019	932	937	1034	825	998	1416	1072	1673	1085	996
1985	1174	1270	1476	1170	1022	1045	1234	1074	1190	1385	1174	2004	1182	1039
1985	1157	1288	1593	1150	1048	1040	1123	975	1185	1395	1157	2032	1266	1012
MOY.	1250	1283	1686	1335	1160	1212	1166	1188	1126	1539	1235	1948	1210	1015
STD.	135	138	234	200	141	134	77	178	100	145	91	148	85	18
NBRE.	26	26	26	26	26	26	22	22	17	17	9	8	4	3

NOTE : -L'erreur standard moyenne est égale à 11%.

-La signification des abréviations est montrée au tableau 4.3.

- topographie
- direction des vents dominants
- pentes

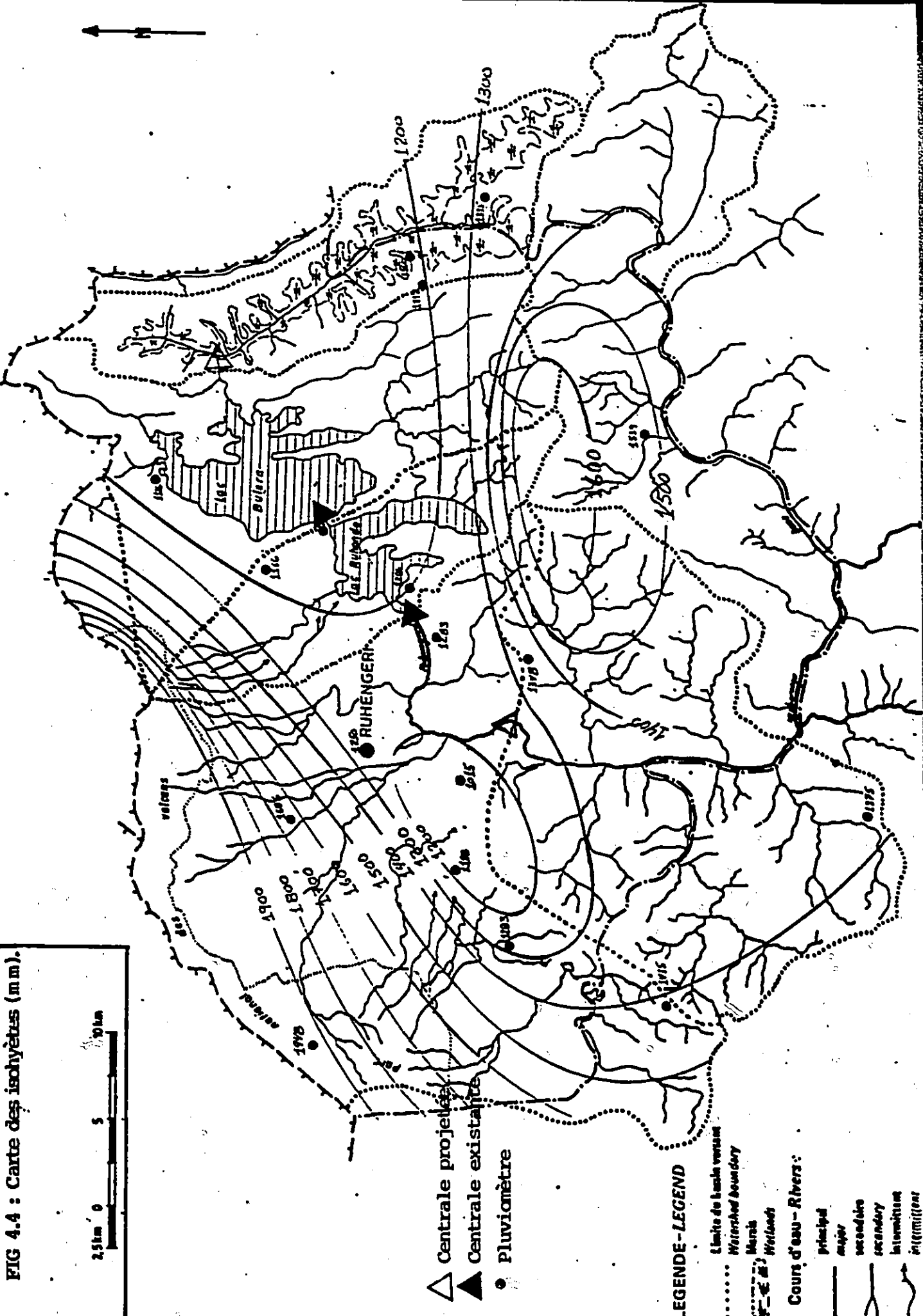
Sur la base des informations disponibles et en s'appuyant également sur l'expérience acquise sur le terrain par l'auteur, la méthode des isohyètes s'est donc avérée la plus appropriée pour établir les précipitations annuelles moyennes qui alimentent chaque sous-bassin.

Les isohyètes ont d'abord été tracés à partir de points de triangulation entre les différentes stations pluviométriques. De là, le parcours des lignes isohyétales a été établi en tenant compte des contraintes topographiques naturelles qui sont, en l'occurrence:

- La chaîne des volcans
- La Crête Zaire - Nil
- Le Mont Kabuye
- Le vents dominants soufflant d'Est en Ouest.

On a obtenu ainsi la carte montrée à la fig. 4.4. On remarque aussitôt que la région des lacs et des marais se trouve dans un creux pluviométrique attribuable soit à l'obstacle provoqué par le Mont Kabuye, soit à une réduction de la réflectivité des lacs et marais (Linsley et al., 1982; Lockwood, 1979), soit finalement à une combinaison de ces deux phénomènes. Rappelons seulement ici que, règle générale, les pluies au Rwanda sont d'origine convective et que le réchauffement diurne provoque régulièrement des orages en milieu de journée. Quelle influence ont les lacs dans ce processus? Nous ne sommes évidemment pas en mesure de répondre ici quantitativement à cette question, mais il n'en demeure pas moins que la grande capacité thermique de l'eau provoque une absorption plus importante de l'énergie de radiation dans les lacs que dans les sols avoisinants. Ce processus aura alors pour effet de diminuer le réchauffement diurnal de l'air environnant et, par voie de conséquence, réduira l'incidence des pluies

FIG 4.4 : Carte des isohyètes (m.m.).



- △ Centrale projetée
- ▲ Centrale existante
- Pluviomètre

LEGENDE - LEGEND

- Limite de bassin versant
- ..... Watershed boundary
- Marais
- Wetlands
- Cours d'eau - Rivers:
- principal
- major
- secondary
- intermittent
- intermittent

convectives au dessus des racs. D'ailleurs, notons simplement que l'albedo (fraction réfléchie de l'énergie de rayonnement incident) Varie entre 0,20 et 0,26 sur des cultures, alors que pour un plan d'eau cette valeur tombe à 0,05 (Lockwood, 1979).

#### **4.2.5 Précipitations annuelles moyennes**

Partant de la carte des isohyètes de la figure 4.4, les précipitations annuelles moyennes pour chaque bassin versant ont été calculées en planimétrant la superficie entre chaque isohyète et en multipliant la valeur obtenue par la moyenne arithmétique de la précipitation entre chaque isohyète. La somme des produits ainsi obtenus à l'intérieur d'un bassin versant, divisée par la superficie totale du bassin considéré donne la précipitation moyenne recherchée. Dans le cas des surfaces délimitées par un seul isohyète, la valeur de la précipitation a été établie en tenant compte des précipitations moyennes obtenues aux stations de mesure sises dans la zone.

L'erreur standard (11%) sur les valeurs des précipitations annuelles déduites à partir de la carte des isohyètes a été calculée à partir de la moyenne de l'erreur standard de chaque station pondérée par le nombre d'années d'observations correspondantes.

Revenons donc au tableau 4.12 qui présente les précipitations annuelles retenues pour dresser la carte des isohyètes. Si on analyse l'erreur standard à chacune des stations, on constate qu'elle varie entre 1,7 et 15%. En pondérant ces erreurs en fonction du nombre d'années d'observation à chacune des stations, nous allons obtenir une erreur standard moyenne de l'ordre de 11% pour l'ensemble des stations retenues. Par ricochet, cette valeur s'appliquera aux précipitations annuelles moyennes générées par la méthode des isohyètes. On retrouvera ainsi aux tableaux 3.1 à 3.4 les résultats obtenus pour chaque sous-bassin.

### **4.3 Evaporation et évapotranspiration**

Reprenant le fait que la balance de chaleur en zone équatoriale est élevée, on est à même de s'attendre à ce que cette chaleur se traduise par une évaporation potentielle importante. Contrairement à la pluie ou au ruissellement, l'évaporation est déterminée à partir de méthodes indirectes. Dans le cas de lacs ou de réservoirs, on peut déterminer l'évaporation suivant différentes méthodes, dont:

- la méthode du bilan hydrique
- la méthode du bilan énergétique.
- la méthode aérodynamique.
- la méthode combinée
- la méthode du bac d'évaporation.

Ces méthodes peuvent également s'appliquer à l'estimation de l'évapotranspiration sur les bassins versants. La détermination de l'évapotranspiration, pour le sous-bassin Rugezi, constitue la pierre angulaire de notre étude, en ce sens que la transformation de tourbières en terres agricoles modifiera l'évapotranspiration sur le sous-bassin.

#### **4.3.1 Sélection d'une méthode d'estimation**

##### **4.3.1.1 Bilan hydrique:**

Dans la méthode du bilan hydrique, on détermine l'évaporation (EV) et l'évapotranspiration (ET) en soustrayant de l'apport en précipitation P, le ruissellement R, la percolation profonde I et les variations d'emmagasinement S. On obtient alors la relation suivante:

$$EV + ET = P - R - I \pm S \quad [4.5]$$

Ainsi, l'évaporation et l'évapotranspiration annuelles sur un bassin versant au cours de l'année hydrologique peuvent être estimées comme étant la différence entre la précipitation

moins le ruissellement R et les variations de stockage, en autant que l'on puisse démontrer par des études hydrogéologiques que la percolation profonde I est négligeable. Sur la base du cycle hydrologique, on peut poser également que les variations de stockage s'annulent.

Pour des périodes plus courtes (semaine, mois), le stockage dans le sol et les cours d'eau doit être pris en compte. On doit alors mesurer le niveau de la nappe phréatique, de même que la teneur en eau dans la zone saturée du sol. La méthode du bilan hydrique se prête finalement bien à l'établissement de l'évaporation et de l'évapotranspiration sur des périodes annuelles, en autant que les pertes en eaux souterraines soient négligeables ou connues avec suffisamment de précision. Au Rwanda, le début des cycles hydrologiques coïncide sensiblement avec le début des saisons sèches de janvier et juillet.

#### 4.3.1.2 Bilan énergétique:

La méthode du bilan énergétique est utilisée pour estimer l'évaporation de lacs et réservoirs ainsi que pour le calcul de l'évapotranspiration.

La méthode se base sur l'évaluation de toutes les sources d'énergie thermique qui entrent et qui sortent du système ainsi que celles qui y sont emmagasinées. Le résidu énergétique est alors imputé aux mécanismes qui régissent l'évaporation et l'évapotranspiration.

Pour les lacs et réservoirs, la méthode fait appel à des mesures de radiations solaires, température de l'air et de l'eau, pression de vapeur, stockage d'énergie dans l'eau et advection.

L'approche aérodynamique:

Cette approche se base sur le transport de la vapeur d'eau vers l'atmosphère suivant un processus turbulent.

L'application de cette méthode pour l'estimation de l'évapotranspiration est très difficile à cause des problèmes liés à la détermination du coefficient d'échange turbulent (OMM, 1974).

Pour calculer l'évaporation au-dessus de lacs et réservoirs, par contre, des recherches faites au lac Hefner (Chow, 1964) ont montré que la relation suivante pouvait produire des résultats intéressants.

$$E_i = N \cdot u \cdot (e_s - e_a) \quad [4.6]$$

où :  $E_i$  = évaporation en cm/jr -

$N$  = coefficient aérodynamique

$u$  = vitesse du vent au-dessus de l'eau (m/sec.)

$e_s$  = pression de vapeur saturée en mbar correspondant à la température de la surface de l'eau.

$e_a$  = pression de vapeur de l'air en mbar.

La valeur de  $N$  représente une combinaison de différentes variables aérodynamiques telles que la structure du vent, la dimension du lac, la rugosité de la surface du lac, la stabilité atmosphérique et autres. Présentement, cette valeur doit être déterminée de façon expérimentale ou par déduction à partir d'un bilan énergétique ou hydrique.

**L'approche combinée (énergétique et aérodynamique):**

Une des méthodes les plus utilisées pour déterminer l'évaporation et l'évapotranspiration s'appuie sur une combinaison de l'approche aérodynamique et du bilan énergétique. On parle alors de la méthode de Penman, dont l'équation générale s'écrit:

$$E_j = R_n \cdot \gamma \cdot \Delta + E_a \quad [4.7]$$

où :  $E_j$  = évaporation d'un plan d'eau;

$\Delta$  = pente de la courbe de pression de vapeur saturée à la température de l'eau;

$R_n$  = radiation nette

$\gamma$  = une constante de l'équation psychrométrique;

$E_a$  = fonction de  $(e_s - e_a)$ , la différence entre la pression de vapeur saturée et la tension de vapeur mesurée.

Pour déterminer l'évapotranspiration, à partir de cette évaporation de plan d'eau, Penman a suggéré l'utilisation de coefficients culturaux avec:

$$ETP_j = K_c \cdot E_j \quad [4.8]$$

Il faut cependant que  $E_j$  soit calculé en utilisant, des paramètres  $R_n$  et  $E_a$  établis pour la culture de référence et qui seront différents de ceux utilisés pour un plan d'eau libre. Ainsi,  $R_n = 0,05$  pour une plan d'eau et  $R_n = 0,20$  pour une culture de référence comme le gazon (Lantagne, 1987; OMM, 1974).

Pour utiliser cette équation, il faut donc distinguer nettement entre l'évaporation des plans d'eau et l'évapotranspiration. Si le rayonnement net est effectivement mesuré et que la fonction du vent est bien ajustée, la formule de Penman s'avère alors extrêmement précise. Une étude menée par Merva et Fernandez en 1982 a permis de dégager les conclusions suivantes:

- 1) Le rayonnement solaire est un paramètre très important de l'équation de Penman.
- 2) Le vent est un paramètre dont la variation a un impact faible (2%) sur l'évapotranspiration.

Il est possible d'estimer indirectement le rayonnement net en faisant intervenir le nombre d'heures d'ensoleillement, la température, l'humidité de l'air et l'albedo de la surface considérée. Ces données sont disponibles pour la station de Ruhengeri. L'application de la méthode Penman modifiée est donc possible ici, compte-tenu que les cultures pour lesquelles sont répertoriés des coefficients cultureux couvrent près de 95% du territoire entourant les lacs et les marais.

#### **Bac d'évaporation**

Les bacs d'évaporation sont couramment utilisés pour estimer l'évaporation d'un lac ou d'un réservoir, ou encore pour calculer l'évapotranspiration. L'intérêt principal de la méthode du bac réside dans sa simplicité. Les bacs emmagasinent cependant moins de chaleur que les lacs et, pour cette raison, on remarque souvent un cycle annuel d'évaporation différent qui se traduit par des extrêmes se produisant plus tôt dans le cas du bac.

L'emplacement des bacs est important et il faut chercher à les installer du côté des vents dominants par rapport à tout lac ou réservoir (Chow et al., 1964).

Suivant l'O.M.M. (1974) il n'en reste pas moins que la méthode du bac donnera des estimations annuelles fiables si on applique les bons coefficients.

En effet comme le mentionne Gray (1972) "les grandes différences entre la capacité d'emmagasinement de chaleur d'un lac et d'un bac peuvent entraîner de grandes variations dans les coefficients du bac si on ne considère que les courtes durées". Pour des périodes de courte durée, Kohler et al. (1955) ont développé des relations permettant de tenir compte de l'énergie d'advection. Par contre, dans le cas de lacs profonds comme ceux de Buïera et Ruhondo, il est nécessaire de considérer la quantité l'énergie calorifique emmagasinée dans le lac et l'énergie nette qui y est transférée par le débit d'eau entrant et sortant.

On possède des données d'évaporation du bac de la station de Ruhengeri-aéroport. Par contre, on ne possède pas d'information sur les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie des lacs, de même que la distribution de la température à l'intérieur des lacs mêmes. Ceci nous amène donc à envisager l'utilisation des données du bac, uniquement sur une base annuelle.

#### Evaporomètre de Piché:

Quoique relativement simple et précise, l'utilisation du bac pose quelques problèmes liés à ses dimensions (débris, vagues, animaux etc...).

On a donc mis au point des appareils plus petits appelés évaporomètres. L'appareil type consiste en un petit cylindre gradué à l'extrémité duquel on a placé un disque poreux maintenu humide et qui se comporte comme un plan d'eau libre.

"L'expérience montre qu'il existe généralement, pour un région donnée, une bonne corrélation entre la quantité d'eau évaporée par l'évaporomètre et l'évapotranspiration (Jacquet, 1963).

Par contre, leur très faible inertie thermique fait que ces appareils sont très sensibles aux particularités du climat local. On peut donc difficilement transposer les données obtenues de ces appareils à des zones relativement éloignées (Gray et al., 1972; Jacquet, 1963; Lantagne, 1987).

L'utilisation des données d'évaporation obtenues par des évaporomètres Piche (Rwerere et Ruhengeri) ne sera donc pas retenue dans l'étude.

## **5.0 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE**

Comme on l'a vu plus haut, le tectonisme et les activités volcaniques qui en dépendent ont profondément marqué l'hydrographie de la région. Lorsque l'on regarde la figure 5.1 on y remarque deux grandes zones "géologiques"; on retrouve tout d'abord la zone du socle précambrien composé de roches fortement métamorphisées et dont les pentes sont accentuées. Cette zone couvre l'ensemble du bassin Rugezi et tout le versant sud des lacs Bulera et Ruhondo. On retrouve également au nord des lacs, une deuxième zone géologique où le socle est recouvert de laves formant une vaste "plaine" propice à l'infiltration.

Nous allons donc regarder plus en détail l'hydrogéologie de ces deux zones.

### **5.1 Région du socle précambrien**

La région des marais et du versant sud des lacs est constituée de roches précambriennes de la série Burundienne. Il s'agit en fait de quartzites alternant avec des schistes (SCET/COOP, 1970). D'un point de vue hydrogéologique, les vides intercrystallins qui forment la porosité de ces roches sont très faibles et rarement interconnectés. A cause de la faible dimension des pores et du peu d'interconnection, la perméabilité primaire de ces roches est donc faible (Fréeze et al., 1979). Des mesures faites sur des spécimens intacts, par Stuart en 1954, ont donné des valeurs de perméabilité de l'ordre de 0,00019 millidarcy ( $10^{-11}$  à  $10^{-13}$  m/s) pour des quartzites, mica schistes et ardoises. C'est donc plutôt par des fracturations et des fissures que va circuler l'eau. Les mouvements tectoniques provoquent des plissements et fractures dans lesquels peuvent se développer des aquifères. Règle générale cependant, ces ouvertures diminuent avec la profondeur (USBR, 1979).

Si nous revenons à la région à l'étude, nous constatons sur les figures 5.1 et 5.2 que le Burundien s'est plissé sur des axes Nord Nord-Ouest: Sud

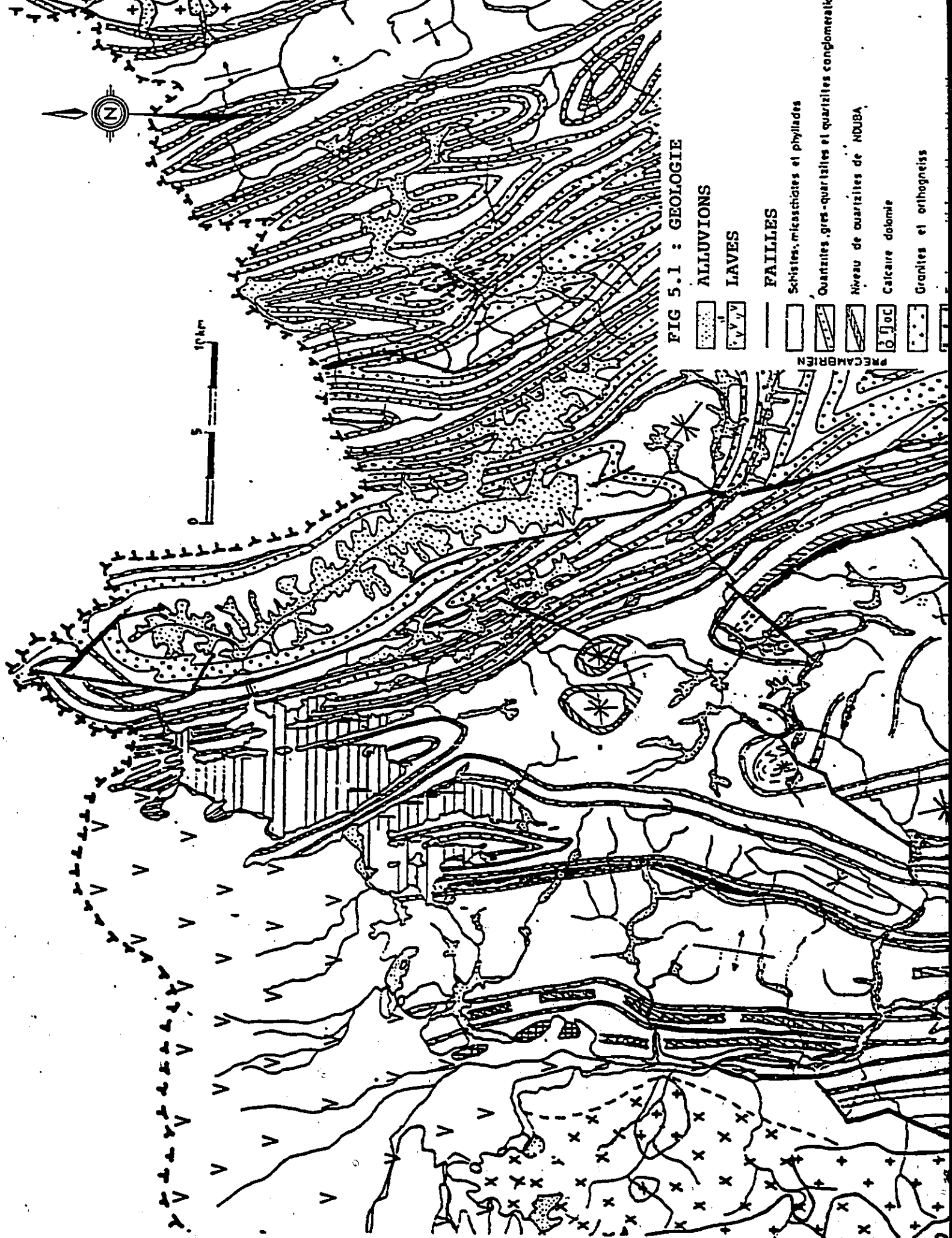


FIG 5.1 : GEOLOGIE

- ALLUVIONS
- LAVES
- PAILLES
- Schistes, micaschistes et phyllades
- Quartzites, gres-quartzites et quartzites conglomératiques
- Niveau de quartzites de NOUBA
- Calcaire dolomique
- Granites et orthogneiss

MECAMBRIEN

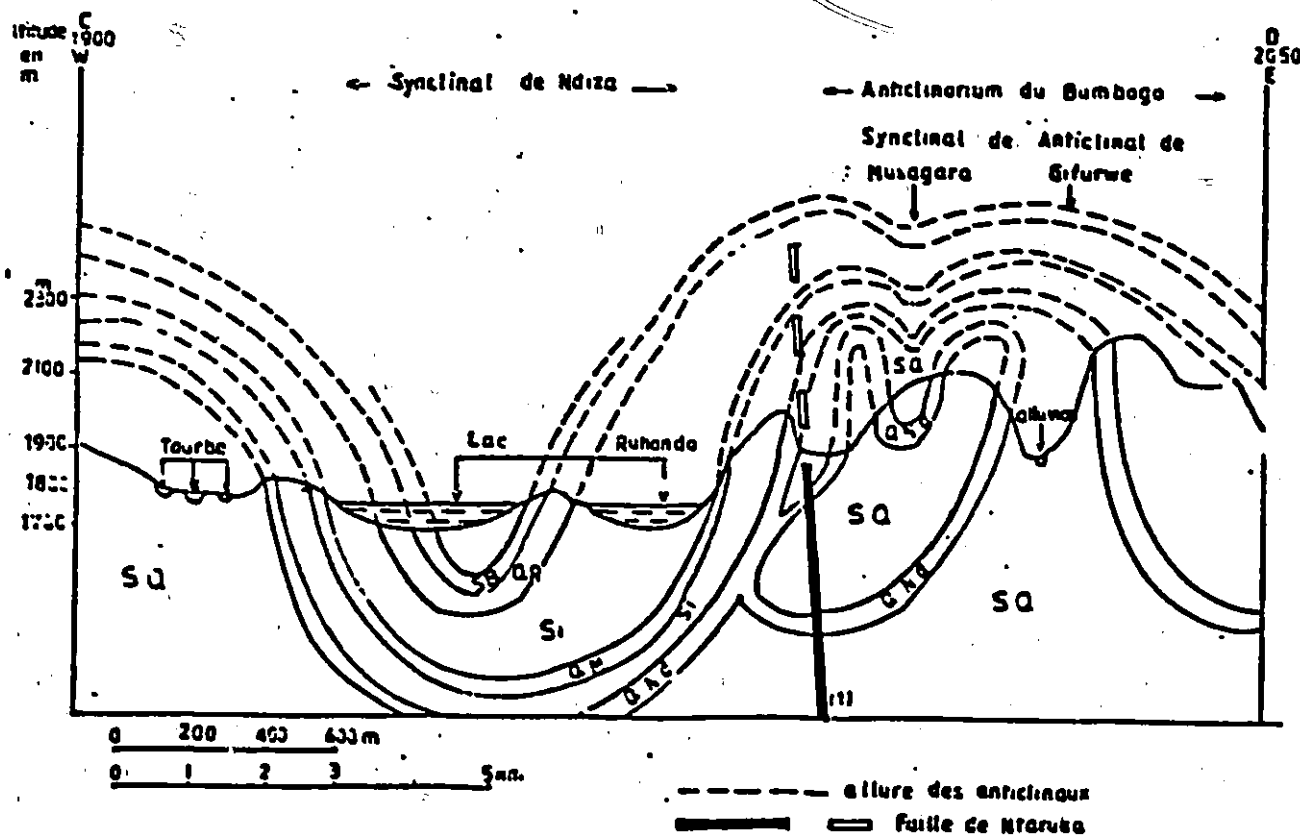
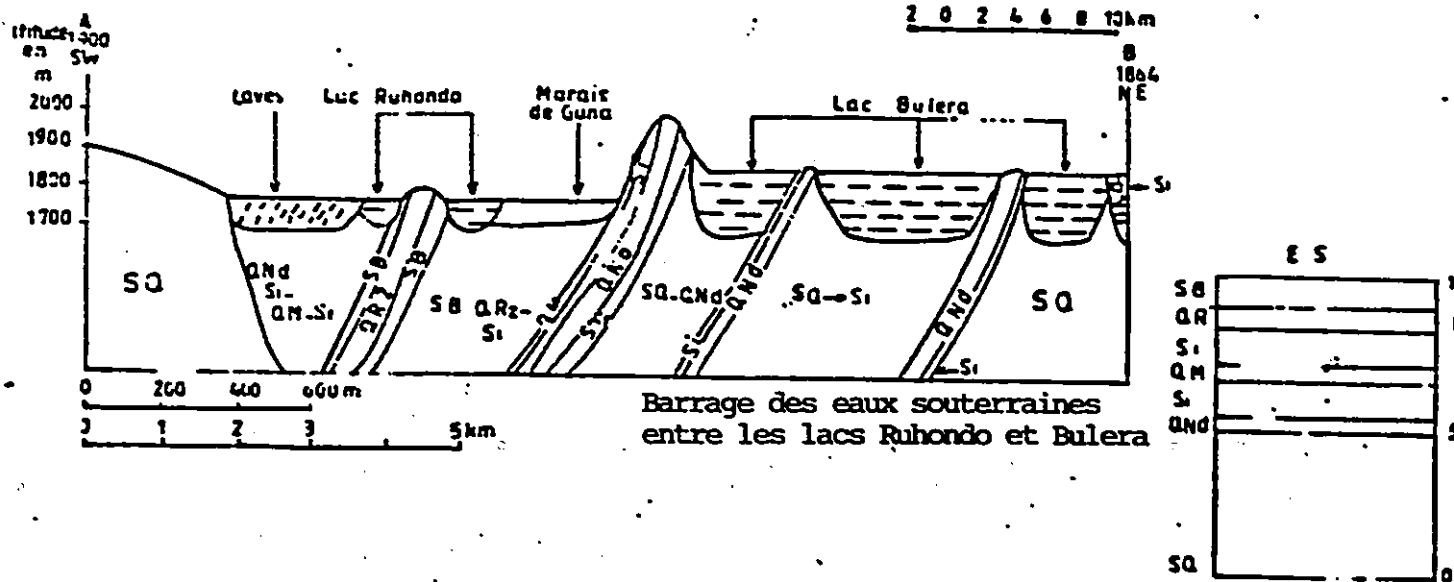
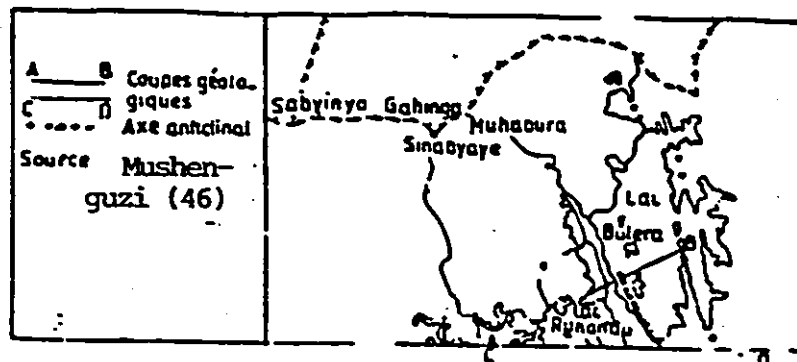


FIG. 5.2 : COUPES GEOLOGIQUES

Sud-Est. On observe successivement d'Ouest en Est: le synclinal de Ndiza couvert en partie par le lac Ruhondo; l'anticlinarium du Bumbogo formant la barre de Ntaruka; le synclinal de la Yanza; l'anticlinarium de Rutongo comprenant l'anticlinal de Buzigi, le synclinal de Rugezi et l'anticlinal de la Rugabago (Antum et al., 1971).

Les failles sont orientées de façon générale du Sud au Nord. D'Ouest en Est, on rencontre la faille de la Ntaruka qui longe la rive occidentale du lac Bulera et sépare le synclinal de Ndiza de l'anticlinorium du Bumbogo, les failles de Kinyababa, de Nemba, de Rulindo et du Rugezi. La nature de ces failles n'a pu être déterminée par suite du manque d'affleurements, mais l'absence de déversement systématique des plis conduit à considérer qu'il s'agit de failles du type des charriages cisailants (Antum et al., 1971).

Du point vue hydrogéologique donc, l'orientation longitudinale de ces failles montre que le mouvement des eaux souterraines se fera dans un axe Nord-Sud perpendiculaire au sens de l'écoulement des eaux de surface. Il n'est donc pas permis de penser qu'il y a une migration importante des eaux souterraines d'un sous-bassin à un autre et en particulier du Lac Bulera vers le lac Ruhondo, ou du bassin Rugezi vers le lac Bulera.

De plus, une inspection visuelle des extrémités Nord et Sud de la faille du Rugezi (rivière Kabwa au Nord et vallée Cyohoha) n'a pas permis de déceler des sources d'eau significatives en contrebas des marais le long des zones de failles. Le caractère cisailant de ces failles peut expliquer leur relative imperméabilité.

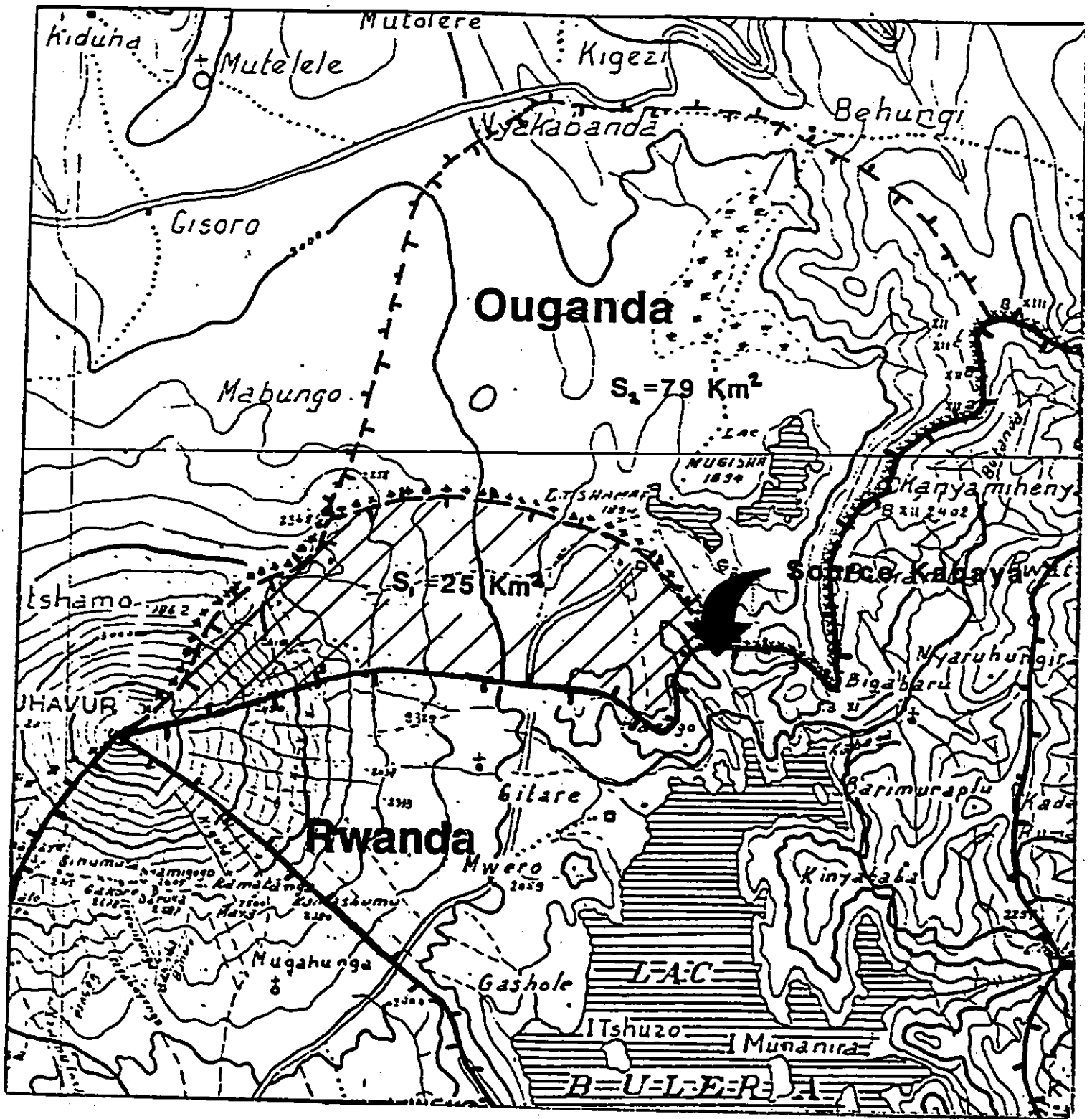
## **5.2 Région des laves**

Les soulèvements tectoniques et les phénomènes volcaniques sont souvent à l'origine de la création de lacs et de la déviation des cours d'eau. On n'a qu'à penser au lac Reelfoot le long du fleuve Mississippi formé en 1811 et 1812 et au lac Earthquake formé sur la rivière Madison au Montana (Horton, 1932).

Les laves sont également caractérisées par un faible ruissellement de surface. En fait une grande partie de la précipitation se retrouve sous forme d'écoulement souterrain et vient contribuer au débit d'étiage des cours d'eau récepteurs. La zone à l'étude n'échappe pas à ce phénomène, qui se traduit par un amortissement important des débits de pointe. Les laves jouent en fait un rôle de temporisateur à l'intérieur du cycle hydrologique (Chow et al., 1964).

Une autre caractéristique commune aux zones de laves consiste en la "disparition", sur des distances appréciables, de cours d'eau qui peuvent réapparaître ensuite sous forme de sources ou de débit d'étiage de cours d'eau. On peut alors se retrouver avec une situation où le bassin versant souterrain ne correspond pas au bassin de surface.

Cette situation est particulièrement vraie dans le cas de la limite Nord du sous-bassin alimentant le lac Bulera (Cyanika). En effet, l'étude des cartes topographiques et des photos aériennes nous a permis de délimiter le bassin versant suivant une ligne partant du sommet du Muhabura et qui passe ensuite par Kabuga, Kagogo et Kabaya. Cette délimitation soustrait plus de (25)km<sup>2</sup> à la superficie du sous-bassin du lac Bulera telle que prise en compte dans d'autres études. En fait, la superficie que nous excluons du bassin alimente une zone dépressionnaire sise en Ouganda et qui forme les lacs Mugisha et Shama. Suivant les photos aériennes et les cartes topographiques, on ne trouve pas d'exutoire à ces lacs situés à environ 30 mètres au dessus du niveau du lac Bulera, mais séparés de celui-ci par un col de laves qui atteint 1900 mètres d'altitude à Kabaya (figure 5.5). La question que l'on est en droit de se poser est la suivante: "existe-t-il une interconnexion entre ces lacs en Ouganda et le lac Bulera via la rivière Kabaya?" Une inspection du site nous a en fait permis d'y découvrir un source importante (10 à 50 l/sec). Suivant les habitants de l'endroit, il ne s'agit cependant pas d'une source pérenne. Tout indique enfin que le bassin versant de surface ne correspond pas au bassin souterrain dans la région de Cyanika à la frontière de l'Ouganda.



Limite du bassin indéterminée

éch : 1 : 100000

FIG. 5.5 : ZONE DE CYANIKA

Un tarage de la rivière Kabaya pourrait, à moyen terme, élucider cette question. Ailleurs, rien n'indique qu'il puisse y avoir de discordance entre les limites souterraines et les limites superficielles des sous-bassins.

Enfin si nous considérons que les laves qui datent du pléistocène sont venues recouvrir le socle précambrien imperméable, on peut raisonnablement penser que les eaux qui percolent au travers des laves se retrouveront éventuellement dans les cours d'eau ou lacs récepteurs. Sur un cycle annuel, on peut alors prétendre que les pertes souterraines sont négligeables à cause de cette imperméabilité du socle.

Par contre, pour décrire de façon quantitative les phénomènes d'écoulement de l'eau dans les laves, il faudrait mettre en branle une campagne de prospection géophysique afin de recueillir les données de base nécessaires à de telles études. A cet égard, rappelons que la zone des laves constitue le château d'eau de la rivière Mukungwa à l'aval surtout des lacs Bulera et Ruhondo. L'optimisation de la conception de la centrale Mukungwa II passe donc par une définition précise des limites du bassin versant souterrain dans les laves. Notons, entre autres, qu'on ne connaît pas l'exutoire de la rivière Mutobo (18 km<sup>2</sup>) et du lac Karago. Leur localisation à l'amont du site de Mukungwa II laisse supposer qu'ils peuvent faire partie du bassin versant qui alimentera la future centrale.

## **6.0 RUISSELLEMENT ET LIMNOLOGIE**

Les données de ruissellement et de limnologie proviennent d'une part du Minagri, responsable de la publication des annuaires hydrologiques du Rwanda, et d'autre part de l'Electro-gaz, responsable des centrales hydro-électriques.

Au Minagri, nous retrouvons les données des stations de jaugeage du Marais Rugezi et de Rwaza (près de la centrale Mukungwa I). On compile également dans les annuaires hydrologiques le niveau journalier des Lacs Bulera et Ruhondo. Le dernier annuaire publié date cependant de 1981. Les données postérieures proviennent alors des fiches de relevés sur le terrain et qui n'ont pas encore été publiées.

Les données de l'Electro-gaz proviennent des rapports techniques mensuels (RTM) soumis par le personnel responsable des centrales hydro-électriques de Ntaruka et de Mukungwa I. On retrouve dans ces rapports les débits moyens turbinés, l'énergie produite ainsi que le niveau des lacs. A Mukungwa I, les mesures de débits sont faites à partir de débitmètres venturi installés sur les machines.

## **6.1 Méthodes et mesures**

### **6.1.1 Débits en rivière**

Les débits en rivière sont mesurés à partir de limnimètres sur lesquels des lectures sont prises trois fois par jour. Les règles limnimétriques sont installées à l'amont de sections de contrôle (ponts, ponceaux). La calibration et la vérification des appareils se fait à intervalles réguliers (2 à 3 fois par année): une équipe du Minagri procède alors à des mesures ponctuelles en utilisant un moulinet qui permet de calculer les vitesses d'écoulement aux sections de contrôle.

La section de contrôle est divisée en tranches de 20 cm où l'on mesure la hauteur d'eau et la vitesse  $V_i$  à mi-hauteur de la section mouillée. Les mesures sont consignées sur des fiches comme celles montrées à l'annexe C. On détermine ensuite le débit entre deux points de mesure à partir de la relation:

$$q = \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot b$$

où : q = débit en m<sup>3</sup>/sec pour une section;  
Vi = vitesse à mi-hauteur en m/sec;  
d = profondeur en m;  
b = largeur de la section en m.

Le débit total Q est ensuite calculé en faisant la sommation des q. On porte alors sur graphique le débit versus la hauteur d'eau mesurée sur le limnimètre pour finalement obtenir une relation hauteur-débit (Fig. 6.1).

Lorsque cette méthode est appliquée suivant les règles de l'art et que l'appareil de mesure et la section de contrôle sont bien localisés, on obtient une précision de l'ordre de 98% (Linsley et al., 1987). L'analyse des figures 6.1 et 6.2 (relation hauteur-débit pour Rugezi et Rwaza), montre au contraire une dispersion importante des mesures de calibration.

En effet si on essaie d'ajuster une courbe représentant ces points et ayant la forme:

$$Q = a \cdot h^b \quad [6.2]$$

où : Q = débit estimé en m<sup>3</sup>/sec;  
h = hauteur limnimétrique en m;  
a et b = paramètres estimés par régression.

Nous constatons au tableau 6.1 que la meilleure approximation de cette courbe "expliquera" environ 80% des valeurs mesurées. Suivant Linsley (1982), une telle dispersion indique soit:

- 1) une modification de la section de contrôle (érosion ou dépôts);
- 2) un refoulement des eaux provoqué par un obstacle à l'aval;

3) un manque de précautions ou des erreurs lors des mesures.

A l'analyse, l'item (2) doit être éliminé puisque la section de contrôle se trouve tout juste à l'amont d'une chute de 200 m. Quant à l'item (1), rappelons que la section de contrôle se trouve dans des buses qui résistent normalement bien à l'érosion. Une révision des procédures de collecte des données est donc recommandée afin de corriger au besoin les erreurs de mesures ou d'interprétation des données.

Entretemps, nous avons donc corrigé les données de débit de façon à ce qu'elles se conforment aux courbes de tarage calculées par régression. Pour ce faire, nous avons tout d'abord traduit sous forme mathématique les courbes de tarage utilisées par le Ministère. Celles-ci ont la forme:

$$Q_m = a_m \cdot h^{b_m} \quad [6.3]$$

$$\text{donc } h = \left( \frac{Q_m}{a_m} \right)^{1/b_m} \quad [6.4]$$

où :  $a_m$  et  $b_m$  sont des coefficients

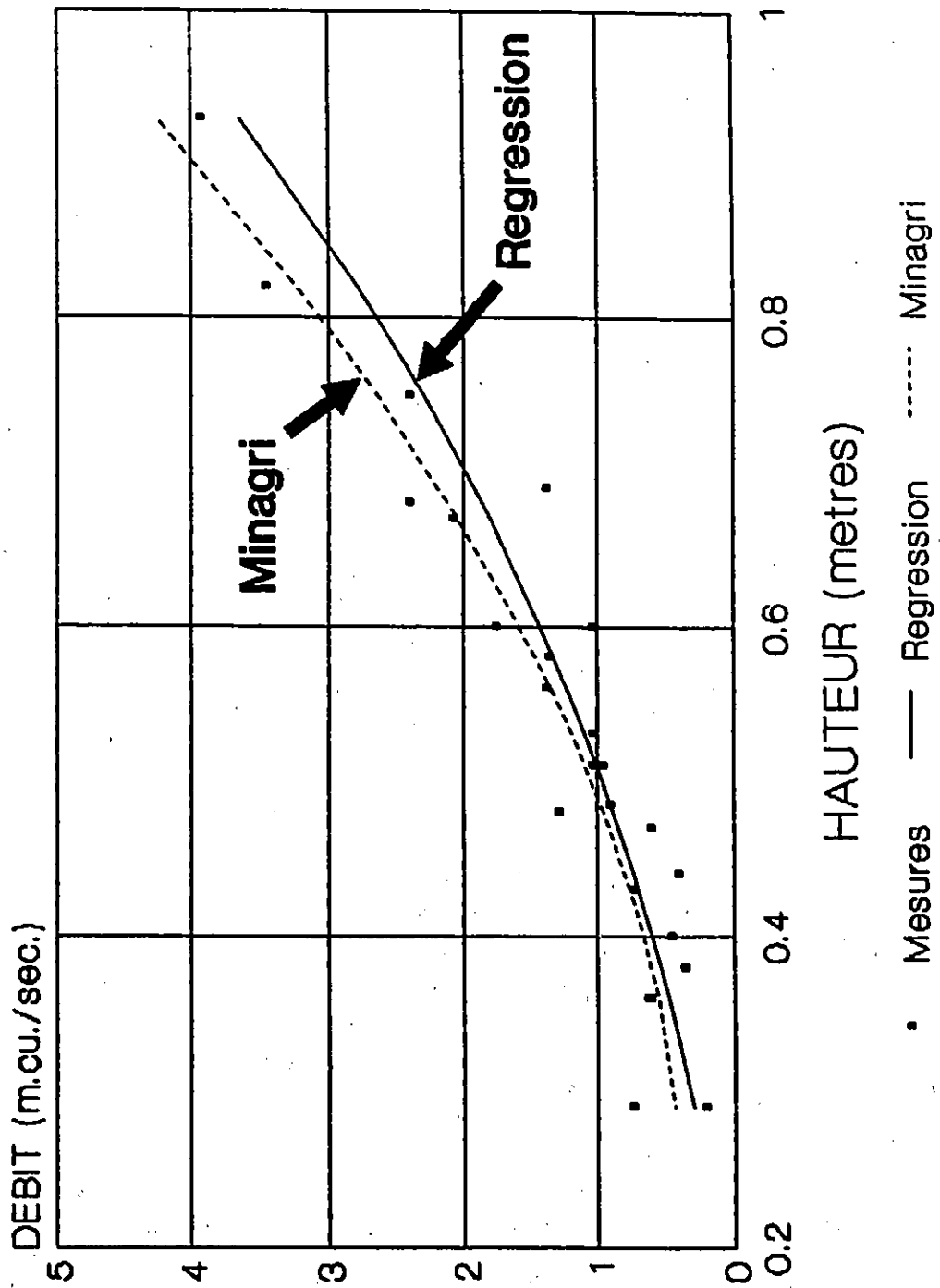
En remplaçant ensuite  $h$  dans l'équation 6.2 nous avons pu établir une relation entre les débits compilés par le Ministère et ceux qui obéissent à la meilleure approximation mathématique calculée par régression. Cette relation s'écrit:

$$Q_r = a_r \times \left( \frac{Q_m}{a_m} \right)^{b_r/b_m} \quad [6.5]$$

où :  $Q_r$  = débit établi par régression en  $m^3/\text{sec}$ ;  
 $a_r$  et  $b_r$  = coefficients établis par régression;  
 $a_m$  et  $b_m$  = coefficients de la courbe du Minagri.

Les valeurs des tableaux 6.3 (a) et (b) donnent les débits mensuels moyens corrigés pour les stations de Rugezi et Rwaza et qui obéissent à une relation hauteur-débit établie par régression. Cette relation est plus représentative des valeurs mesurées pour la gamme des débits mensuels moyens qui nous intéressent ( $0.7$  à  $2.0 m^3/s$ ).

**FIG.6.1: COURBE HAUTEUR-DEBIT  
STATION RUGEZI**



**FIG.6.2: COURBE HAUTEUR-DEBIT  
STATION RWAZA**

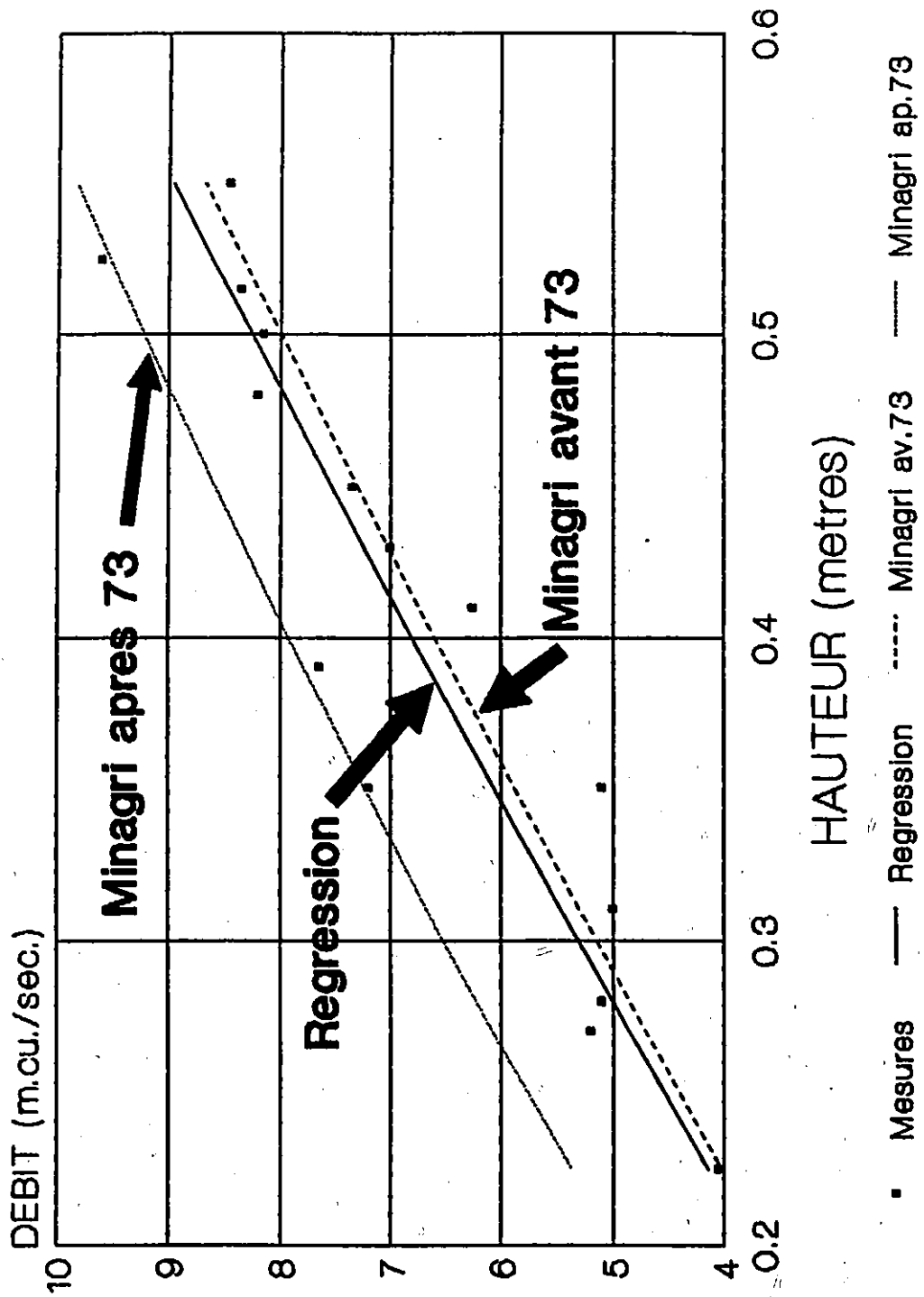


TABLEAU 6.1: COURBE HAUTEUR-DEBIT  
STATION RUGEZI

POINT	JAUGE H metre	DEBITS(m.cu./sec.)			LOG(H)	LOG(Qm)	LOG(Qv)
		Qm mesuré	ESTIMATION Régr. Visuelle				
7	0.290	0.730	0.300	0.440	-0.5376	-0.1367	-0.35654
20	0.290	0.200	0.300	0.440	-0.5376	-0.6990	-0.35654
26	0.360	0.620	0.477	0.550	-0.4437	-0.2076	-0.25963
8	0.360	0.600	0.477	0.550	-0.4437	-0.2218	-0.25963
13	0.380	0.350	0.536	0.610	-0.4202	-0.4559	-0.21467
22	0.400	0.450	0.598	0.660	-0.3979	-0.3468	-0.18045
25	0.430	0.720	0.698	0.760	-0.3665	-0.1427	-0.11918
9	0.440	0.400	0.733	0.800	-0.3565	-0.3979	-0.09691
15	0.470	0.600	0.844	0.910	-0.3279	-0.2218	-0.04095
23	0.480	1.280	0.883	0.950	-0.3188	0.1072	-0.02227
18	0.485	0.900	0.903	0.980	-0.3143	-0.0458	-0.00877
16	0.510	1.025	1.006	1.090	-0.2924	0.0107	0.037426
17	0.510	0.950	1.006	1.090	-0.2924	-0.0223	0.037426
12	0.530	1.025	1.092	1.190	-0.2757	0.0107	0.075546
24	0.560	1.370	1.229	1.350	-0.2518	0.1367	0.130333
19	0.580	1.350	1.325	1.460	-0.2366	0.1303	0.164352
10	0.600	1.025	1.425	1.590	-0.2218	0.0107	0.201397
31	0.600	1.750	1.425	1.580	-0.2218	0.2430	0.198657
30	0.670	2.070	1.805	2.050	-0.1739	0.3160	0.311753
21	0.680	2.400	1.863	2.120	-0.1675	0.3802	0.326335
11	0.690	1.370	1.922	2.200	-0.1612	0.1367	0.342422
14	0.750	2.400	2.299	2.640	-0.1249	0.3802	0.421603
28	0.820	3.450	2.783	3.230	-0.0862	0.5378	0.509202
29	0.930	3.920	3.644	4.250	-0.0315	0.5933	0.620388

REGRESSION SUR LES DEBITS MESURES

Regression Output:  
 Constant 0.629150  
 Std Err of Y Est 0.142897  
 R Squared 0.805803  
 No. of Observations 24  
 Degrees of Freedom 22  
 X Coefficient(s) 2.142656  
 Std Err of Coef. 0.224257

REGRESSION SUR ESTIMATION VISUELLE

Regression Output:  
 Constant 0.652202  
 Std Err of Y Est 0.032516  
 R Squared 0.986227  
 No. of Observations 24  
 Degrees of Freedom 22  
 X Coefficient(s) 2.025469  
 Std Err of Coef. 0.051029

VALEURS DE CORRECTION

Bv= 2.025469 B=Bx/Bv= 1.057856  
 LOG(Av)= 0.652202  
 Bx= 2.142656  
 LOG(Ax)= 0.629150

TABLEAU 6.2: COURBE HAUTEUR-DEBIT  
STATION RYAZA

DEBITS(m.cu./sec.)										REGRESSION SUR LES DEBITS MESURES	
POINT	JAUGE	Qm	ESTIMATION			LOG(H)	LOG(Qm)	LOG(Q1)	LOG(Q2)	Regression Output:	
	H metre		mesuré	Régr.	Q1<73					Q2>73	Constant
6	0.225	4.05	4.14	4.02	5.37	-0.648	0.607	0.604	0.730	1.176450	0.042069
5	0.270	5.20	4.85	4.70	6.07	-0.569	0.716	0.673	0.783	0.864503	15
4	0.280	5.10	5.00	4.85	6.23	-0.553	0.708	0.686	0.794	0.864503	13
3	0.310	5.00	5.46	5.30	6.67	-0.509	0.699	0.724	0.824		
1	0.350	5.10	6.07	5.88	7.24	-0.456	0.708	0.770	0.860	X Coefficient(s) 0.863084	
14	0.350	7.20	6.07	5.88	7.24	-0.456	0.857	0.770	0.860	Std Err of Coef. 0.094768	
13	0.390	7.65	6.66	6.46	7.79	-0.409	0.884	0.810	0.892		
11	0.410	6.25	6.95	6.74	8.06	-0.387	0.796	0.829	0.906		
2	0.430	7.00	7.25	7.02	8.32	-0.367	0.845	0.846	0.920		
9	0.450	7.35	7.54	7.30	8.58	-0.347	0.866	0.863	0.934		
16	0.480	8.20	7.97	7.72	8.97	-0.319	0.914	0.888	0.953		
18	0.500	8.15	8.25	7.99	9.22	-0.301	0.911	0.903	0.965		
12	0.515	8.35	8.47	8.20	9.40	-0.288	0.922	0.914	0.973		
15	0.525	9.60	8.61	8.34	9.53	-0.280	0.982	0.921	0.979		
7	0.550	8.45	8.96	8.68	9.83	-0.260	0.927	0.938	0.993		

<p>VALEURS DE CORRECTION-AVANT 73</p> <p>Bv= 0.8603 B=Bv/Bvl.0031</p> <p>LOG(Av)= 1.1617</p> <p>Br= 0.8630</p> <p>LOG(Ar)= 1.1764</p>	<p>VALEURS DE CORRECTION-DEPUIS 73</p> <p>Bv= 0.676883 B=Bv/Bvl. 1.275084</p> <p>LOG(Av)= 1.168391</p> <p>Br= 0.863084</p> <p>LOG(Ar)= 1.176450</p>
---	---

<p>REGRESSION SUR ESTIMATION VISUELLE AVANT 1973</p> <p>Regression Output:</p> <p>Constant 1.161779</p> <p>Std Err of Y Est 0.000000</p> <p>R Squared 1</p> <p>No. of Observations 15</p> <p>Degrees of Freedom 13</p> <p>X Coefficient(s) 0.860361</p> <p>Std Err of Coef. 0.000000</p>
--

<p>REGRESSION SUR ESTIMATION VISUELLE Après 1973</p> <p>Regression Output:</p> <p>Constant 1.168391</p> <p>Std Err of Y Est 0</p> <p>R Squared 1</p> <p>No. of Observations 15</p> <p>Degrees of Freedom 13</p> <p>X Coefficient(s) 0.68</p> <p>Std Err of Coef. 0.00</p>
---

### **6.1.2 Niveau des lacs et volume de stockage**

Le relevé du niveau des lacs est fait à partir de règles limnimétriques qui sont installées aux prises d'eau des deux barrages contrôlant le niveau des lacs Bulera et Ruhondo.

Des relevés sont faits trois fois par jour et les valeurs moyennes journalières sont consignées dans les annuaires hydrologiques.

Les données du niveau des lacs serviront à deux fins: d'une part la lecture au début de chaque année permettra de calculer le volume d'eau en plus ou en moins dans le lac. Deuxièmement, pour calculer les volumes d'eau turbinés à la centrale Ntaruka nous avons dû (voir 6.1.3) tenir compte de la hauteur de chute brute de la centrale (différence de niveau entre les deux lacs).

#### **Volume de stockage**

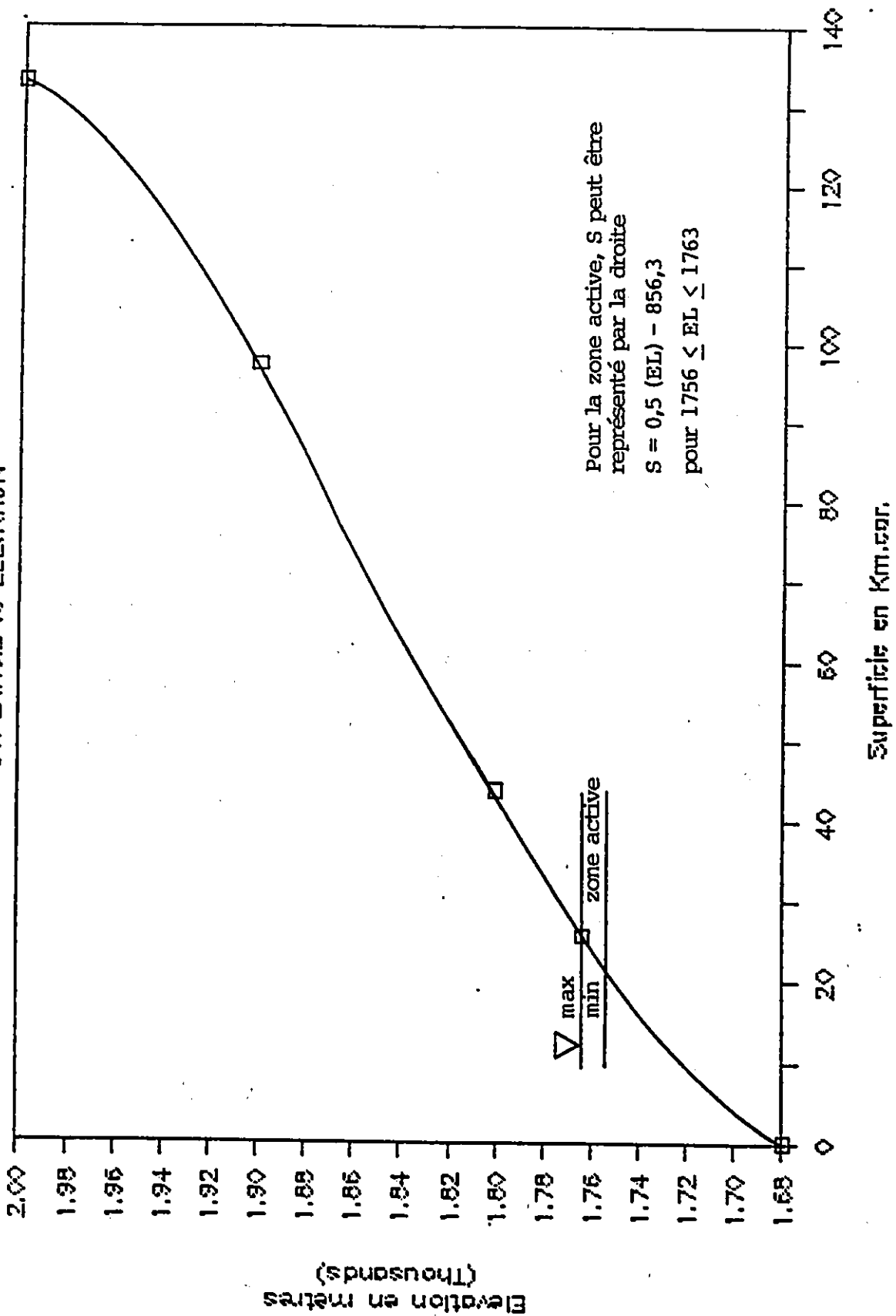
Pour déterminer le volume de stockage, nous utilisons, règle générale, une courbe représentant la hauteur versus le volume en réserve. On détermine normalement le volume à partir de la méthode de la moyenne des aires: on planimètre la superficie pour différentes cotes du lac et ensuite on calcule le volume à partir de la moyenne des surfaces entre deux cotes. Comme nous n'avons pas de carte bathymétrique des lacs, nous avons établi une relation entre la superficie et l'élévation en planimétrant des cotes connues au-dessus du niveau du lac. La superficie sous le niveau du lac a ensuite été obtenue par extrapolation. On peut voir aux figures 6.3 et 6.4 le type de profil obtenu. Cette méthode est d'autant plus fiable que le niveau d'opération des lacs varie dans la portion rectiligne de ces courbes.

Ainsi nous obtenons:

- Superficie du lac Bulera =  $0,449 \times \text{Altitude} - 787,5 \text{ km}^2$  [6.6]
- Superficie du lac Ruhondo =  $0,5 \times \text{Altitude} - 856,3 \text{ km}^2$  [6.7]

# FIG.6.3 : LAC RUHONDO

SUPERFICIE vs ELEVATION



# FIG.6.4 : LAC BULERA

SUPERFICIE vs ELEVATION

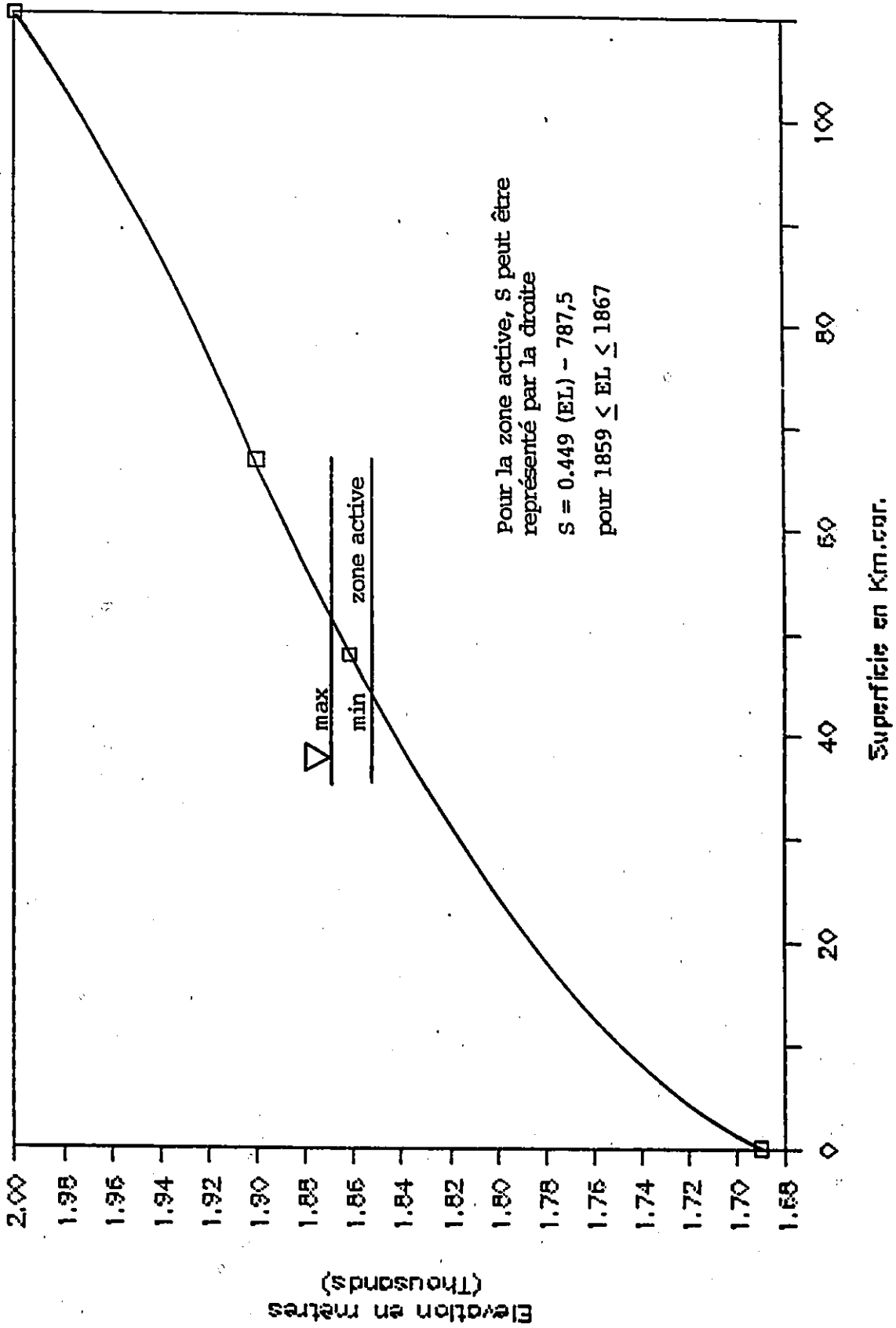


TABLEAU 6.3a: DEBITS MENSUELS MOYENS CORRIGES (m.cu./sec.) SOURCE: TABLEAU 6.1

STATION: RUGEZI COTE : 2044 m.		LONG. EST: 29 49' LAT. SUD: 1 25'		SUPERFICIE: Avant juin 87 après		14761 19426	ha. ha.						LANE D'EAU	VOLUME ANNUEL million de m.cu.
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT.	NOV.	DEC.	m.m./an	
1957								0.842	0.515	0.533	0.696	0.769		
1958	0.805	0.769	1.335	3.183	5.014	2.205	1.054	0.551	0.551	0.623	0.498	1.101	315.8	46.620
1959	0.915	0.805	0.732	1.429	2.515	1.147	0.533	0.444	0.732	1.288	1.448	0.915	230.0	33.948
1960	1.008	0.659	0.551	1.515	1.101	0.515	0.391	0.334	0.444	0.462	0.444	0.374	138.6	20.464
1961	0.321	0.374	0.426										208.6	30.786
1962			0.805	1.194					0.962	1.619	3.539	1.781	227.4	33.572
1963	2.515	1.147	1.008	2.593	5.501	3.361	0.769	0.347	0.623	0.444	0.687	1.382	363.5	53.655
1964	1.054	0.623	0.805	1.848	2.030	0.696	0.426	0.374	0.426	0.732	0.551	0.769	184.7	27.269
1965	1.241	0.962	0.732	2.127	1.581	0.769	0.462	0.360	0.480	0.769	0.879	1.008	202.1	29.833
1966	0.769	0.696	1.915	1.382	1.581	0.596	0.444	0.409	0.559	0.515	0.659	0.623	184.6	27.244
1967	0.426	0.347	0.321	0.659	2.593	1.335	0.659	0.410	0.600	0.805	0.805	1.581	188.7	27.856
1968	0.696	1.008	1.382	2.360	2.139	1.515						1.241	236.5	34.905
1969	0.498	1.054	1.781	1.288	1.304	0.533	0.436	0.339	0.462	0.480	0.480	0.533	163.2	24.096
1970	0.551	0.587	0.769	1.147	2.050	0.962	0.587	0.515	0.498	0.915	0.971	0.523	181.5	26.793
1971	0.567	0.510	0.487	2.195	3.252	1.600	0.980	0.627	0.577	0.943	0.934	0.869	241.7	35.679
1972	0.759	1.082	1.705	2.331	3.440	2.496	1.439	0.650	0.650	0.750	1.392	1.045	316.0	46.639
1973	0.569	0.668	0.560	1.307	2.292	1.373	0.578	0.462	0.741	0.787	1.762	1.054	216.3	31.931
1974	0.769	0.587	1.316	3.212	1.887	1.877	2.272	1.073	1.119	0.732	0.750	0.723	291.0	42.953
1975	0.687	0.641	0.934	2.633	1.973	1.297	0.879	0.732	1.477	2.691	1.505	1.129	295.6	43.637
1976	0.714	0.696	0.687	0.971	2.127	1.410	0.796	0.943	0.915	0.851	0.962	0.943	214.3	31.633
1977	0.913	1.443	1.240	1.732	1.923	1.224	0.808	0.745	0.741	0.607	1.949	1.820	269.0	39.700
1978	1.111	1.110	2.586	2.683	3.104	1.316	0.823	0.732	0.705	0.879	0.971	1.045	304.4	44.925
1979	1.054	1.401	1.439	1.648	2.195	1.600	0.999	0.971	0.569	0.498	0.542	0.560	239.5	35.352
1980	0.569	0.587	0.659	1.326	2.418	1.800	0.814	0.560	0.623	0.542	1.316	1.157	220.5	32.549
1981	0.906	0.696	0.668	1.458	2.966	1.279	0.732	0.934	0.842	0.897	1.008	0.705	233.6	34.484
1982	0.641	0.560	0.551	1.534	3.104	2.002	0.833	0.569	0.787	1.026	1.724	1.629	266.9	39.400
1983	0.805	0.632	0.659	1.176	1.543	0.833	0.596	0.560	0.668	1.810	2.021	1.867	235.1	34.708
1984	1.147	0.879	1.194	1.781	1.147	0.732	0.551	0.515	0.515	0.842	0.962	0.842	197.7	29.180
1985	0.587	0.587	0.962	3.005	2.127	1.101	0.623	0.498	0.533	1.101	0.879	0.962	231.0	34.095
1986	0.701	0.696	1.013	1.960	2.272	1.512	0.530	0.481	0.498	0.530	0.542	0.537	200.6	29.613
1987	0.556	0.643	1.178	1.798	1.879	2.053	0.784	0.523	0.612	1.191	2.163			
MOY.	0.923	0.783	1.023	1.822	2.357	1.389	0.784	0.600	0.595	0.907	1.158	1.057	235.154	34.711
STD.	0.414	0.287	0.522	0.655	0.885	0.618	0.390	0.211	0.233	0.491	0.566	0.406	47.053	6.946
MAX.	2.515	1.443	2.586	3.212	5.501	3.361	2.272	1.073	1.477	2.691	3.539	1.867	363.489	53.655
MIN.	0.321	0.347	0.321	0.559	1.147	0.523	0.426	0.339	0.426	0.444	0.480	0.533	163.240	24.096
NBRE.	25	25	26	25	24	24	23	23	24	24	24	25	26	26

note: les moyennes et données statistiques sont calculées pour la période de 1961 à 1986

TABLEAU 6.3b: DEBITS MENSUELS MOYENS CORRIGES (m.cu./sec.) SOURCE: TABLEAU 6.2

		STATION: RWAZA 1714.6 m.		LONG. EST: 29 41' LAT. SUD: 1 32'		Mise en eau du barrage: 28 Aout 1981 Dérivation: 22 mars 1979		VOLUME ANNUEL				en millio de m.cu.		
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	CCT.	NOV.	DEC.	MOYENNE	
1961	7.95	7.72	7.78	8.13	9.48	7.39	6.96	6.99	8.93	8.25	9.52	9.72	8.22	259.161
1962	8.22	8.47	7.97	8.33	9.57	8.90	6.58	7.67	9.49	8.42	12.29	10.63	8.39	280.260
1963	10.90	9.39	8.70	10.36	17.04	14.49	9.37	7.35	8.07	8.21	9.00	8.99	10.16	320.286
1964	8.88	8.52	8.38	9.62	11.84	8.94	7.43	7.26	6.81	7.27	7.88	7.86	8.39	264.635
1965	7.59	8.46	7.59	8.58	9.60	8.58	7.14	6.71	7.03	7.30	8.18	8.44	7.93	250.125
1966	8.19	7.21	8.61	8.11	9.28	7.98	6.54	6.16	5.94	7.82	6.23	5.07	7.25	228.746
1967	4.64	4.35	4.64	5.22	10.94	10.97	5.36	3.91	5.07	6.52	7.53	8.26	6.44	203.155
1968	5.51	5.94	8.40	8.84	11.49	10.21	7.39	5.51	5.07	5.07	6.23	6.23	7.16	225.690
1969	5.94	6.95	8.84	9.27	9.71	8.40	5.94	5.07	5.51	6.08	7.10	7.10	7.16	225.786
1970	6.81	6.37	6.23	8.55	8.98	7.58	6.81	6.23	6.66	6.23	7.24	7.39	7.10	223.872
1971	7.73	10.24	7.79	6.66	7.60	9.33	7.49	6.56	7.12	8.12	8.84	7.88	7.95	250.590
1972	7.81	7.68	8.59	8.68	8.84	8.33	7.36	5.87	6.07	6.53	7.86	8.09	7.64	241.039
1973	6.19	6.28	6.98	8.25	8.91	7.58	5.92	5.81	7.29	7.22	8.87	7.89	7.25	228.641
1974	7.20	6.76	7.49	10.79	10.07	8.75	9.00	6.95	7.30	7.00	7.59	5.31	7.85	247.534
1975	7.49	7.59	7.49	8.96	9.16	8.04	7.13	7.06	7.95	9.29	8.81	8.48	8.12	256.054
1976	7.00	8.21	8.19	8.33	8.37	7.69	7.30	7.33	7.96	8.93	8.82	8.72	8.07	254.536
1977	8.31	8.55	8.91	9.97	10.09	8.25	7.57	7.55	8.33	8.43	11.65	10.78	9.03	284.825
1978	8.76	8.54	11.11	10.67	10.63	9.08	8.76	7.66	4.67	4.10	5.06	6.08	7.93	249.988
1979	6.13	6.39	7.08	7.16	10.42	11.04	10.55	9.16	9.73	7.63	7.79	6.59	8.31	261.921
1980	4.92	5.56	4.91	4.90	4.63	7.91	7.29	5.37	5.85	6.39	7.18	7.02	5.99	189.038
1981	6.46	13.92	12.12	7.19	5.44	5.30	14.03	9.23	12.81	18.16	15.50	9.05		
1982	7.79	7.89	7.93	6.43	7.87	7.44	6.76							
MISE EN SERVICE DE MUKUNGWA I														
MOY.	7.29	7.77	7.99	8.32	9.54	8.73	7.67	6.86	7.54	7.76	8.53	7.89	7.84	247.29
STD.	1.40	1.98	1.60	1.54	2.34	1.74	1.81	1.90	2.29	2.63	2.24	1.50	0.90	28.45
MAX.	10.90	13.92	12.12	10.79	17.04	14.49	14.03	9.23	12.81	18.16	15.50	10.78	10.16	320.29
MIN.	4.64	4.35	4.64	4.90	4.63	5.30	5.36	0.00	4.10	4.10	5.06	5.07	5.99	189.04
NBRE.	22	22	22	22	22	22	22	21	21	21	21	21	20	20

Partant de là et en appliquant la méthode de la moyenne des aires, il a été possible de générer les tableaux 6.4 et 6.5 qui donnent les volumes cumulatifs des réserves actives d'eau pour les centrales de Ntaruka et Mukungwa I.

Dans le calcul des volumes sortant de chacun des lacs, les volumes stockés en plus ou en moins pour chaque année ont été calculés en prenant la différence entre le volume cumulatif au début de l'année et celui à la fin de l'année.

### **6.1.3 Volumes annuels turbinés**

#### **6.1.3.1 Centrale de Ntaruka**

Mise en service en 1961, la centrale de Ntaruka est située à l'exutoire du lac Bulera. Depuis 1972, tout le débit sortant du lac est turbiné par la centrale et aucun déversement au trop-plein n'a été signalé. A chaque mois, l'équipe responsable de l'opération consigne sur des rapports techniques mensuels diverses données, dont la production énergétique mensuelle, les débits max., min., et moyen, le niveau des lacs etc... Au fil des années, les seules données complètes que nous avons pu recueillir sont les données de production énergétique mensuelles et annuelles ainsi que le niveau des lacs. Les données sur les débits turbinés sont souvent incomplètes. Nous avons donc repris les données de production énergétique pour ensuite les traduire en volumes turbinés. On trouvera à l'annexe D les calculs à partir desquels nous avons établi l'efficacité et la hauteur de chute effective pour chaque mois.

Les aspects intéressants à retenir de ces calculs sont, d'une part, que pour une hauteur de chute d'environ 103m, les pertes de charge dans les conduites d'amenée sont de l'ordre de 0,94m. Deuxièmement, en régime normal, les pertes dans les turbines et l'aspirateur de sortie se chiffrent à 1,05m.

TABLEAU 6.4: COURBE VOLUMETRIQUE DU LAC BULERA

DONNEES DE DEPART		GENERATION DE VALEURS-COURBE VOLUMETRIQUE DU LAC BULERA			
ALT. m.	SUPERFICIE Km.car.	ALT. m.	SUPERFICIE Km.car.	VOLUME 10**6 m.cu	VOL.CUMUL 10**6 m.c
1862	47.6	1859.7	47.30	0.00	0.00
1900	66.4	1859.8	47.34	4.73	4.73
2000	110.0	1859.9	47.39	4.74	9.47
Regression Output:		1860.0	47.43	4.74	14.21
Constant	-787.491	1860.1	47.48	4.75	18.96
Std Err of Y Est	1.278230	1860.2	47.52	4.75	23.71
R Squared	0.999202	1860.3	47.57	4.75	28.46
No. of Observations	3	1860.4	47.61	4.76	33.22
Degrees of Freedom	1	1860.5	47.66	4.76	37.98
X Coefficient(s)	0.448884	1860.6	47.70	4.77	42.75
Std Err of Coef.	0.012680	1860.7	47.75	4.77	47.52
		1860.8	47.79	4.78	52.30
		1860.9	47.84	4.78	57.08
		1861.0	47.88	4.79	61.87
		1861.1	47.93	4.79	66.66
		1861.2	47.97	4.80	71.45
		1861.3	48.02	4.80	76.25
		1861.4	48.06	4.80	81.06
		1861.5	48.11	4.81	85.87
		1861.6	48.15	4.81	90.68
		1861.7	48.20	4.82	95.50
		1861.8	48.24	4.82	100.32
		1861.9	48.29	4.83	105.15
		1862.0	48.33	4.83	109.98
		1862.1	48.38	4.84	114.81
		1862.2	48.42	4.84	119.65
		1862.3	48.47	4.84	124.50
		1862.4	48.51	4.85	129.35
		1862.5	48.56	4.85	134.20
		1862.6	48.60	4.86	139.06
		1862.7	48.65	4.86	143.92
		1862.8	48.69	4.87	148.79
		1862.9	48.74	4.87	153.66
		1863.0	48.78	4.88	158.53
		1863.1	48.83	4.88	163.41
		1863.2	48.87	4.88	168.30
		1863.3	48.92	4.89	173.19
		1863.4	48.96	4.89	178.08
		1863.5	49.01	4.90	182.98
		1863.6	49.05	4.90	187.88
		1863.7	49.10	4.91	192.79
		1863.8	49.14	4.91	197.70
		1863.9	49.18	4.92	202.62
		1864.0	49.23	4.92	207.54
		1864.1	49.27	4.93	212.46
		1864.2	49.32	4.93	217.39
		1864.3	49.36	4.93	222.33
		1864.4	49.41	4.94	227.27
		1864.5	49.45	4.94	232.21

TABLEAU 6.5: COURBE VOLUMETRIQUE DU LAC RUMONDO

VALEURS DE DEPART		VALEURS GENEREES			
ALT.(m)	SUPERFICIE en km.ca.	ALT. m	SURFACE Km.car.	VOLUME 10 <sup>6</sup> m.cu.	VOL.CUMUL 10 <sup>6</sup> m.c
1764	25.7	1756.0	21.7	0.00	0.00
1800	43.7	1756.1	21.9	2.17	2.17
1900	97.2	1756.2	21.8	2.18	4.35
2000	133.0	1756.3	21.9	2.18	6.53
		1756.4	21.9	2.19	8.72
		1756.5	22.0	2.19	10.91
		1756.6	22.0	2.20	13.11
		1756.7	22.1	2.20	15.31
		1756.8	22.1	2.21	17.52
		1756.9	22.2	2.21	19.73
		1757.0	22.2	2.22	21.95
		1757.1	22.3	2.22	24.17
		1757.2	22.3	2.23	26.40
		1757.3	22.4	2.23	28.63
		1757.4	22.4	2.24	30.87
		1757.5	22.5	2.24	33.11
		1757.6	22.5	2.25	35.36
		1757.7	22.6	2.25	37.61
		1757.8	22.6	2.26	39.87
		1757.9	22.7	2.26	42.13
		1758.0	22.7	2.27	44.40
		1758.1	22.8	2.27	46.67
		1758.2	22.8	2.28	48.95
		1758.3	22.9	2.28	51.23
		1758.4	22.9	2.29	53.52
		1758.5	23.0	2.29	55.81
		1758.6	23.0	2.30	58.11
		1758.7	23.1	2.30	60.41
		1758.8	23.1	2.31	62.72
		1758.9	23.2	2.31	65.03
		1759.0	23.2	2.32	67.35
		1759.1	23.3	2.32	69.67
		1759.2	23.3	2.33	72.00
		1759.3	23.4	2.33	74.33
		1759.4	23.4	2.34	76.67
		1759.5	23.5	2.34	79.01
		1759.6	23.5	2.35	81.36
		1759.7	23.6	2.35	83.71
		1759.8	23.6	2.36	86.07
		1759.9	23.7	2.36	88.43
		1760.0	23.7	2.37	90.80
		1760.1	23.8	2.37	93.17
		1760.2	23.8	2.38	95.55
		1760.3	23.9	2.38	97.93
		1760.4	23.9	2.39	100.32
		1760.5	24.0	2.39	102.71

Solution retenue: droite passant par 1764 et 1800 m.

Enfin nous avons pu établir que l'efficacité (rendement énergétique excluant les pertes de charges hydrauliques) est de l'ordre de 0,84 pour un débit de 2,5 m<sup>3</sup>/sec. par turbine. De là nous avons établi la relation suivante:

$$V_t = 437,1 \times E_p + H_{eff}. \quad [6.8]$$

où :  $V_t$  = Volume turbiné en m<sup>3</sup>;  
 $E_p$  = Energie en kw.heures;  
 $H_{eff}$  = Hauteur de chute effective en mètre;  
=  $H_t - 1,99$   
 $H_t$  = Hauteur totale en mètres (différence entre l'élévation du lac Bulera et celle du lac Ruhondo).

Les volumes annuels turbinés à la centrale Ntaruka ont donc été calculés à partir de cette relation.

#### **6.1.3.2 Centrale de Mukungwa I**

Plus moderne, la centrale de Mukungwa I fut mise en service en 1982 et est équipée de débitmètres à venturi installés sur la chape des turbines. Nous avons donc repris tout simplement les données volumétriques consignées dans les rapports de production annuelle tels que préparés par les responsables de la centrale.

#### 6.1.4 Volumes déversés aux trop-pleins des barrages

Jusqu'en 1972, des volumes importants d'eau ont transité par l'évacuateur de crue du barrage Ntaruka. Reprenant les méthodes de calcul suggérées par Creager et Justin (1950) et en appliquant un coefficient de déversoir variant avec la hauteur d'eau appliquée au seuil, nous avons, à l'annexe D, établi que:

$$C_w = 2,1664 \times hc^{0,119554} \quad [6.9]$$

$$\text{et } Q = C_w \times L_e \times hc^{1.5} \text{ m}^3/\text{sec} \quad [6.10]$$

où:  $C_w$  = coefficient du déversoir;  
 $hc$  = hauteur de charge en mètre;  
 $L_e$  = largeur effective du seuil en mètre;  
=  $(24-2.6) \times hc$ .

L'équation [6.9] est conforme aux modèles expérimentaux de Rouse et Reid (1935) et de Nagler et Davis (1930). La largeur effective du déversoir est également fonction de la hauteur de charge.

Nous avons utilisé ces relations afin de calculer les volumes déversés annuellement au barrage de Ntaruka.

Rappelons d'autre part que depuis sa mise en eau en 1982, le second déversoir situé à la prise d'eau de Mukungwa I n'a pas connu de déversement au trop-plein.

#### 6.2 Compilation des volumes

Les tableaux 6.6 et 6.7 présentent finalement les volumes annuels (1961 à 1986) d'eau de surface qui sont sortis ou qui ont été stockés à chacun des sous-bassins à l'étude (Rugezi, Bulera et Ruhondo).

Il est intéressant de noter ici que le sous-bassin Rugezi contribue pour l'équivalent de 31% du volume d'eau disponible pour la production d'énergie à Ntaruka et pour 14% du volume d'eau turbinable à Mukungwa I.

TABLEAU 6.6: VOLUMES SORTANT OU ENMAGASINES AU LAC BULERA

ANNEE	Niv.Bulera(m.)		Niv.Ruhondo(m.)		Energie produite Mil.Kwh	VOLUMES (millions de m.cu.)				RUGEZI	
	Début	noyen	Début	noyen		Turbines	Déversés	Stockés	Total	Vol.	%
1961	1863.83	1863.83	1759.53	1759.44	7.500	32.014		13.343		30.786	
1962	1864.10	1864.12	1759.52	1759.59	8.000	34.102	65.576	4.950	104.628	33.572	32.1
1963	1864.20	1864.20	1759.67	1759.74	8.700	37.111	150.428	-0.990	186.549	53.655	28.8
1964	1864.18	1864.09	1759.64	1759.55	9.800	41.771	60.717	-1.485	101.002	27.269	27.0
1965	1864.15	1864.07	1759.42	1759.43	11.100	47.266	50.303	-3.959	93.610	29.833	31.9
1966	1864.07	1864.01	1759.44	1759.35	14.800	63.008	30.235	-9.885	83.359	27.244	32.7
1967	1863.87	1863.91	1759.54	1759.57	15.400	65.768	8.718	7.906	82.392	27.856	33.8
1968	1864.03	1863.01	1759.47	1759.48	17.600	75.763	40.208	-7.412	108.559	34.905	32.2
1969	1863.88	1863.85	1759.33	1759.38	20.400	87.011	22.305	-19.717	89.599	24.096	26.9
1970	1863.48	1863.65	1759.26	1759.27	24.000	102.455	5.043	-2.460	105.038	26.793	25.5
1971	1863.43	1863.47	1759.19	1759.22	25.277	108.042	0.000	-0.492	107.550	35.679	33.2
1972	1863.42	1863.73	1759.21	1759.24	29.416	125.441	0.496	25.632	151.569	46.639	38.8
1973	1863.94	1863.63	1759.40	1759.36	31.513	134.673	0.000	-21.697	112.976	31.931	28.3
1974	1863.50	1863.66	1759.28	1759.33	31.019	132.483	0.000	6.894	139.377	42.953	30.8
1975	1863.64	1863.53	1759.32	1759.24	36.936	157.819	0.000	-7.386	150.433	43.637	29.0
1976	1863.49	1863.24	1759.32	1759.34	41.800	179.281	0.000	-62.131	117.151	31.633	27.0
1977	1862.22	1861.61	1759.57	1759.59	46.675	203.954	0.000	-59.003	144.951	39.700	27.4
1978	1861.00	1860.63	1759.63	1759.38	38.004	167.352	0.000	-16.804	150.548	44.926	29.8
1979	1860.65	1860.85	1759.55	1760.08	29.821	131.955	0.000	-22.478	109.477	35.352	32.3
1980	1860.18	1860.33	1759.77	1760.19	20.467	91.145	0.000	16.251	107.396	32.549	30.3
1981	1860.52	1861.07	1759.10	1759.69	14.255	62.692	0.000	40.372	103.064	34.484	33.5
1982	1861.36	1861.70	1760.56	1758.80	16.610	71.949	0.000	47.988	119.937	39.400	32.9
1983	1862.35	1862.17	1758.57	1758.69	25.424	109.497	0.000	1.461	110.958	34.708	31.3
1984	1862.38	1862.16	1758.59	1758.42	29.153	125.235	0.000	-34.954	90.281	29.180	32.3
1985	1861.66	1861.49	1758.00	1757.88	27.264	117.270	0.000	-18.836	98.434	34.095	34.6
1986	1861.27	1861.32	1758.57	1758.63	23.963	104.014	0.000	-20.689	83.325	29.613	35.5
1987	1860.84	1861.02	1758.02	1758.04	26.836	116.151	0.000	4.804	120.955		
1987	1860.94										
Volume en réserve: 76.47						MOYENNE	114.351	34.711	30.8		
						ECART-TYPE	25.059	6.946	2.6		

REGRESSION LINEAIRE ENTRE RUGEZI ET BULERA

Regression Output:  
 Constant 0  
 Std Err of Y Est 9.376585  
 R Squared 0.870404  
 No. of Observations 25  
 Degrees of Freedom 24

X Coefficient(s) 3.276374

On peut donc écrire que la relation:

$$VOL.BULERA = 3.276 \times VOL.RUGEZI$$

explique 87 % des variations.

TABLEAU 6.7: VOLUMES SORTANT OU ENMAGASINES AU LAC RUFONDO

ANNEE	Niv. Rufondo (m.)		Débit moyen Rwaza	VOLUMES (millions de m.cu.)			RUGEZI		BULERA		
	Début	moyen		Turbinés	Déversés	Stockés	Total	Vol.	%	Vol.	%
1961	1759.53	1759.44	8.22	259.161	-0.235	258.926	30.786	11.9		0.0	
1962	1759.52	1759.59	8.89	280.260	3.525	283.784	33.572	11.8	104.628	36.9	
1963	1759.67	1759.74	10.16	320.286	-0.706	319.580	53.655	16.8	186.549	58.4	
1964	1759.64	1759.55	8.39	264.635	-5.162	259.473	27.269	10.5	101.802	38.9	
1965	1759.42	1759.43	7.93	250.125	0.468	250.593	29.833	11.9	93.610	37.4	
1966	1759.44	1759.35	7.25	228.746	2.344	231.091	27.244	11.8	83.359	36.1	
1967	1759.54	1759.57	6.44	203.155	-1.642	201.513	27.856	13.8	82.392	40.9	
1968	1759.47	1759.48	7.16	225.690	-3.276	222.414	34.905	15.7	108.559	48.8	
1969	1759.33	1759.38	7.16	225.786	-1.634	224.152	24.096	10.7	89.599	40.0	
1970	1759.26	1759.27	7.10	223.872	-1.632	222.240	26.793	12.1	105.038	47.3	
1971	1759.19	1759.22	7.95	250.590	0.466	251.056	35.679	14.2	107.550	42.8	
1972	1759.21	1759.24	7.64	241.039	4.437	245.476	46.639	19.0	151.569	61.7	
1973	1759.40	1759.36	7.25	228.641	-2.804	225.836	31.931	14.1	112.976	50.0	
1974	1759.28	1759.33	7.85	247.534	0.934	248.468	42.953	17.3	139.377	56.1	
1975	1759.32	1759.24	8.12	256.054	0.000	256.054	43.637	17.0	150.433	58.8	
1976	1759.32	1759.34	8.07	254.536	5.856	260.391	31.633	12.1	117.151	45.0	
1977	1759.57	1759.59	9.03	284.825	1.410	286.235	39.700	13.9	144.951	50.6	
1978	1759.63	1759.38	7.93	249.938	-1.880	248.109	44.926	18.1	150.548	60.7	
1979	1759.55	1760.08	8.31	261.921	5.177	267.098	35.352	13.2	109.477	41.0	
1980	1759.77	1760.19	7.13	224.883	-15.690	209.193	32.549	15.6	107.396	51.3	
1981	1759.10	1759.69	11.20	353.298	34.478		34.484		103.064		
1982	1760.56	1758.80		134.558	-46.730		39.400		119.937		
1983	1759.57	1758.69		229.280	0.000	0.460	229.740	34.708	15.1	110.958	48.3
1984	1758.59	1758.42		221.992	0.000	-13.480	208.512	29.180	14.0	90.281	43.3
1985	1758.00	1757.88		246.967	0.000	13.020	259.988	34.095	13.1	98.434	37.9
1986	1758.57	1758.63		246.042	0.000	-12.566	233.476	29.613	12.7	83.325	35.7
1987	1758.02	1758.04								120.955	
				MOYENNE		245.975	34.711	14.0	114.351	44.5	
				ECART-TYPE		26.773	6.946	2.3	25.059	12.3	

REGRESSION LINEAIRE ENTRE RUGEZI ET RUFONDO

Regression Output:  
 Constant 87.35496  
 Std Err of Y Est 20.14082  
 R Squared 0.394013  
 No. of Observations 4  
 Degrees of Freedom 2  
 X Coefficient(s) 4.563599  
 Std Err of Coef. 4.001919

On peut donc écrire que la relation:

$$VOL.RUH = 87.35 + 4.56 X VOL.RUG$$

n'explique que 39 % des variations.  
 L'analyse n'a porté que sur les 4 années d'opération de la centrale.

Si nous retenons finalement qu'il s'écoulera à la future centrale Mukungwa II, un volume de  $286,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  selon les chiffres de la société Motor-Columbus (1987), l'importance relative du sous-bassin Rugezi tombera alors à 12% pour cette future centrale.

### 6.3 Commentaires sur les volumes de chaque sous-bassin

On voit au tableau 6.6 que le volume annuel d'eau sortant du sous-bassin Rugezi est fortement corrélé avec celui du Lac Bulera ( $C_r = 0,87$ ). Toute hausse ou baisse du volume provenant de Rugezi et qui est attribuable à des modifications des caractéristiques physiques du sous-bassin, risque de se répercuter à l'aval vers le Lac Bulera.

Quant au tableau 6.7, on y constate que la corrélation entre les volumes sortant de Rugezi et ceux sortant du Lac Ruhondo est plutôt faible. L'apport relatif du sous-bassin Rugezi au sous-bassin Ruhondo est par contre assez stable et de l'ordre de 14%.

Pour les besoins de cette étude, il n'est pas nécessaire de refaire à chaque sous-bassin un bilan hydrique détaillé. On voit en effet à la figure 6.5 qu'en discrétisant le bassin versant, le sous-bassin Rugezi constitue un ensemble indépendant qui peut être isolé dans une équation de bilan hydrique. L'équation du bilan hydrique pour le sous-bassin du lac Bulera peut alors s'écrire:

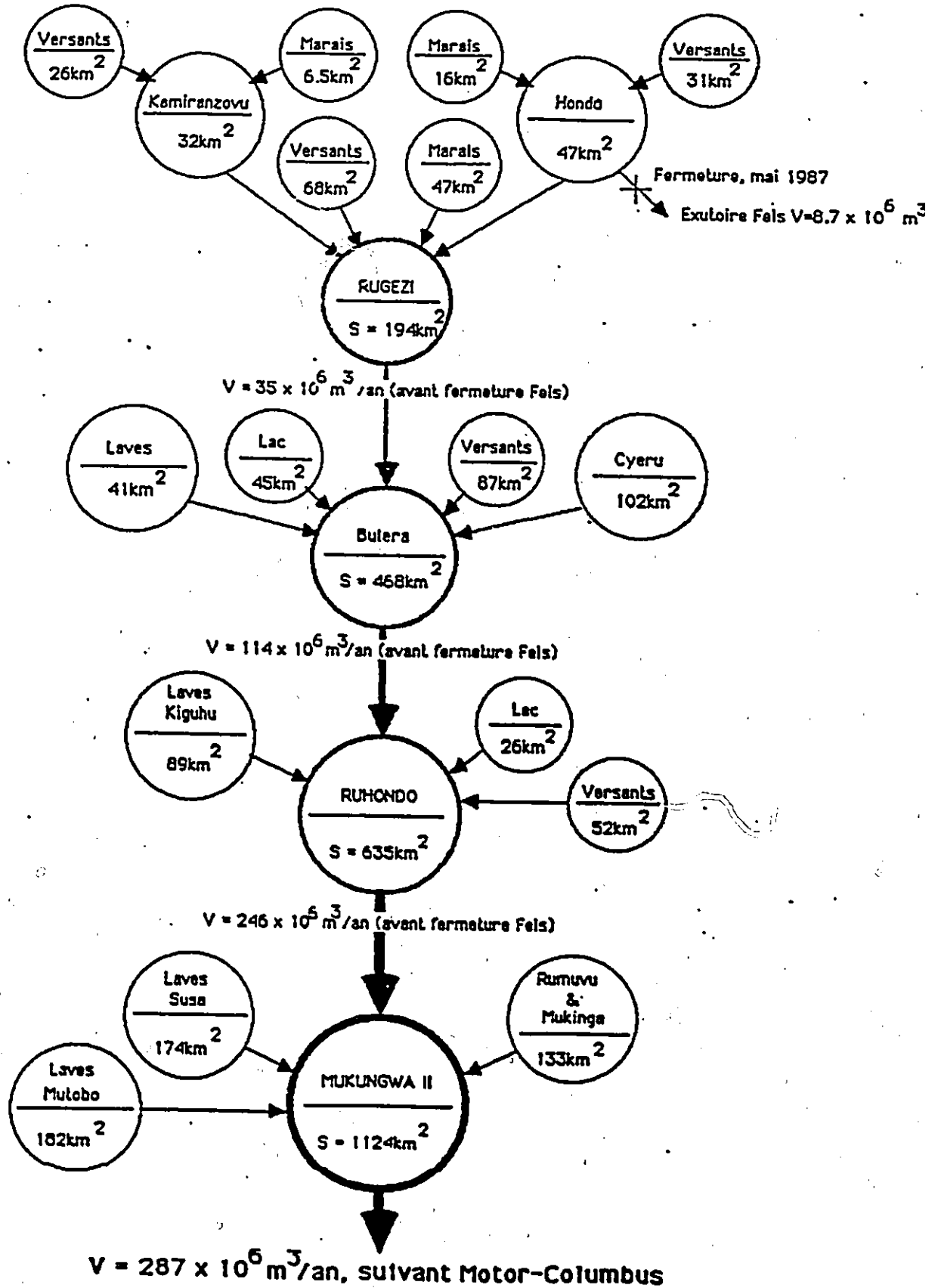
$$V_B = V_R + (P_i - EV_i - ET_i - I_i - S_i) \cdot A_i \quad [6.11]$$

où :  $V_B$  = Volume de ruissellement du sous-bassin Bulera;

$V_R$  = Volume de ruissellement du sous-bassin Rugezi.

Ainsi, si nous modifions les caractéristiques physiques du sous-bassin Rugezi sans influencer les autres composantes des bassins versants à l'aval, l'impact se répercutera directement à l'aval.

**FIGURE 6.5**  
**Schema du bassin versant**  
**de la haute Mukungwa**



## 7.0 BILAN HYDRIQUE DU SOUS-BASSIN RUGEZI

Sur une base annuelle, l'équation générale du bilan hydrique peut s'écrire:

$$R = P - EV - ET - I + S \quad [7.1]$$

où : R = Ruissellement exprimé en mm/an;

P = Précipitation annuelle exprimée en mm/an;

EV = Evaporation exprimée en mm/an;

ET = Evapotranspiration exprimée en mm/an;

I = Infiltration profonde exprimée en mm/an;

S = Emmagasinement de l'eau dans le système (en mm/an).

Nous connaissons les valeurs de R et de P et comme nous l'avons vu plus haut, sur un cycle annuel, l'emmagasinement de l'eau dans les sols du sous-bassin (S) sera pratiquement nul, compte tenu que le début de l'année (janvier) correspond également à une saison sèche au Rwanda et qu'en pareil cas, l'eau disponible dans les sols tend vers zéro. Les variations de volume d'eau disponible dans les sols (S) seront donc très faibles d'un cycle hydrologique à l'autre.

Quant à l'évaporation proprement dite, elle provient des surfaces d'eau libre et tout particulièrement des lacs. Dans le sous-bassin Rugezi, ces surfaces sont pratiquement inexistantes et on peut donc affirmer que l'évaporation (EV) sera également nulle

Quant à l'infiltration profonde, la géologie nous montre aux figures 7.1 et 5.1 que le sous-bassin repose sur un synclinal de roches précambriennes imperméables. La présence d'une tourbière vient également appuyer cette approche, comme d'ailleurs le souligne Jatou (1977) lorsqu'il considère le substratum de tourbières (hautes ou basses) comme étant imperméable.

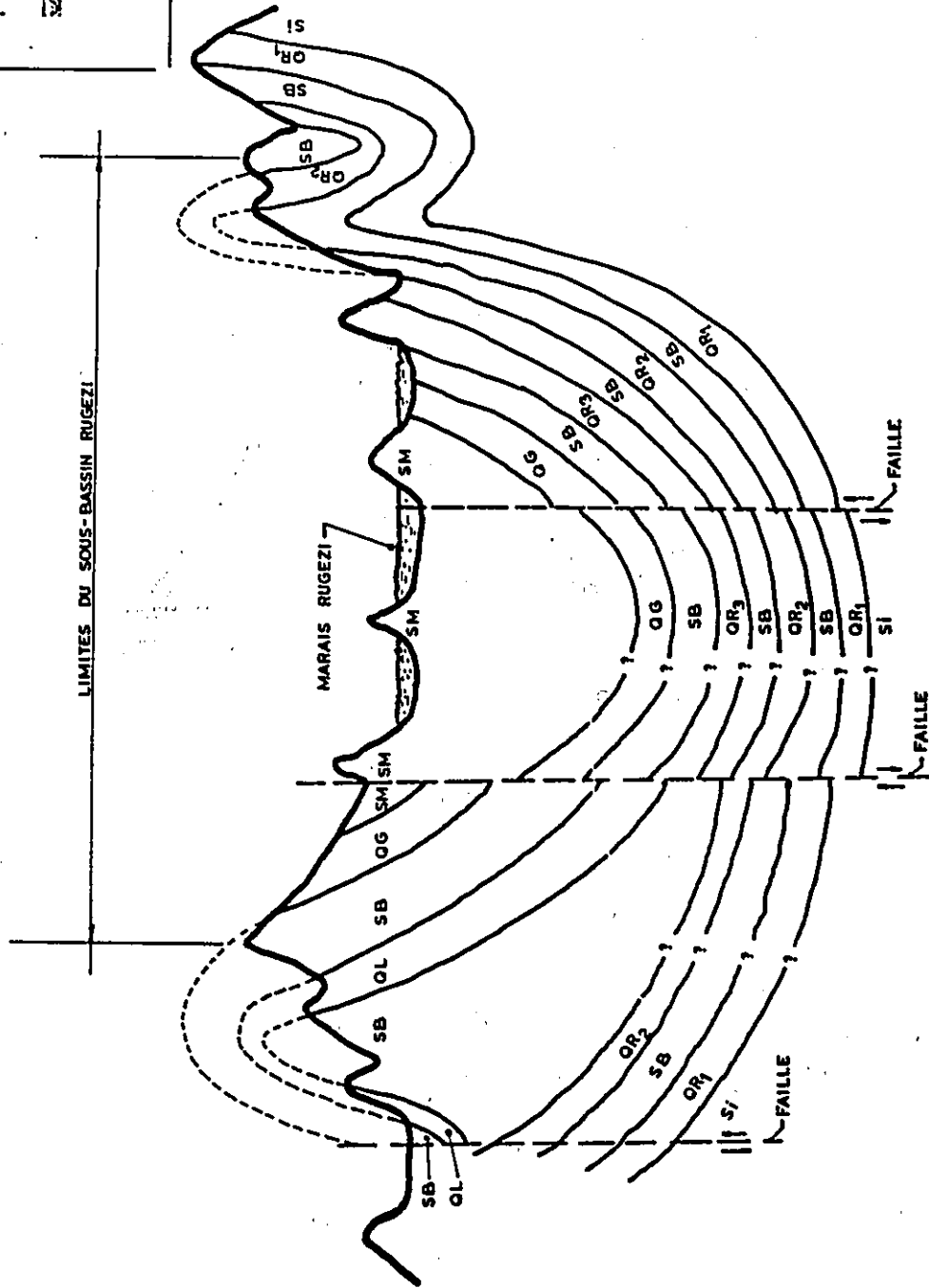
Cette considération est également partagée par Sharma (1988) dans son étude de l'évaporation des marais de Lukanga en Zambie. Tout comme ce dernier, nous en arrivons à établir, en reprenant l'équation 7.1, que:

$$R = P - ET \quad [7.2]$$

$$\text{où : } ET = P - R \quad [7.2a]$$



PLAN CLÉ



Coupe géologique  
Sous-bassin Rugezi

SOURCE: Carte géologique 1:100 000  
Carte topographique 1:50 000

Fig. 7.1

Suivant la méthode des isohyètes, nous avons que  $P = 1215$  mm/an. (Tableau 3.1). De la même façon, on retrouve au tableau 6.3a, que  $R = 235$  mm/an. En remplaçant ces valeurs dans l'équation 7.2a, on trouve que:

$$\text{donc : } \boxed{\begin{array}{l} ET = 1215 - 235 \text{ [mm/an]} \\ ET = 980 \text{ [mm/an]} \end{array}} \quad [7.3]$$

Cette valeur s'accorde bien avec celles trouvées par Sharma (1985): pour l'ensemble du bassin de la rivière Chambezi, l'évapotranspiration moyenne déduite de l'équation du bilan était égal à 950 mm/an pour un coefficient de variation de 0,10. De plus, l'étude tendait à montrer que pour des bassins d'Afrique centrale, l'eau retournée à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration pouvait atteindre plus de 80% des précipitations. Nous trouvons également le même résultat.

## **7.1 Validation du bilan hydrique**

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la méthodologie d'analyse propose de valider l'équation du bilan hydrique en comparant la valeur obtenue pour l'évapotranspiration, avec celles déduites à partir de méthodes indirectes dont celle du bac, celle de Penman modifiée, et la méthode de Turc.

### **7.1.1 Méthode du bac**

Les bacs à évaporation sont des espèces de cuvettes remplies d'eau propre et auxquels on ajoute périodiquement de l'eau pour compenser celle qui s'est évaporée. De nombreuses études effectuées sous des climats et pays différents ont démontré qu'il existe pour un site donné une excellente relation entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évaporation de l'eau d'un bac (Ebac).

Dans le but de comparer et d'utiliser les résultats des études sur l'évaporation mesurée à partir des bacs dans différents environnements, on a cherché à standardiser ce type d'équipement. La station synoptique de Ruhengeri est ainsi équipée depuis avril 1979 d'un bac de

type U.S. Standard Class A. Il s'agit d'un bac cylindrique de 121 cm de diamètre et de 25,5 cm de profondeur. Il est fabriqué en acier galvanisé (0,79 mm). Le bac est monté sur un cadre de bois formant une plate-forme évidée, de sorte que le fond du bac se trouve à 15 cm au-dessus du niveau du sol. On remblaie le sol jusqu'à 5 cm du fond du bac. Celui-ci doit être bien horizontal. On le remplit d'eau jusqu'à 5 cm du bord.

On renouvelle l'eau régulièrement pour éviter une turbidité excessive. Si le bac est en fer galvanisé, on le repeint chaque année avec de la peinture d'aluminium.

Les bacs d'évaporation permettent de mesurer l'effet intégré du rayonnement, du vent, de la température et de l'humidité sur l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Les végétaux réagissent d'une manière similaire aux mêmes variables climatiques, mais plusieurs facteurs importants peuvent entraîner des différences appréciables en ce qui concerne la perte d'eau. Le rayonnement que réfléchit un plan d'eau n'est que de 5 à 8 pour cent, tandis que pour la plupart des surfaces végétatives, il représente 20-25 pour cent du rayonnement solaire reçu. L'emménagement de chaleur dans le bac pendant le jour peut être appréciable et entraîner une répartition presque égale de l'évaporation entre la nuit et le jour alors que, pour la plupart de cultures, les pertes sur 24 heures se produisent à 95 pour cent ou plus pendant les heures diurnes (Doorenbos et al., 1975).

En dépit de ces inconvénients, les bacs restent d'un emploi sûr pour prévoir l'évapotranspiration sur des périodes décennales ou plus longues. Dans le cas qui nous concerne ici, nous traiterons de périodes mensuelles.

La méthode du bac procède de la façon suivante:

Tableau 7.1

Méthode du bac à évaporation. Valeurs des coefficients de bac "K<sub>bac</sub>" suggérés par la FAO.

1. - Bac de classe A.

Bac classe A	CAS A } Bac environné d'une culture verte courte				CAS B } Bac environné d'une jachère sèche				
	HR Moyenne %		Faible < 40	Moyenne 40-70	Fort > 70		Faible < 40	Moyenne 40-70	Fort > 70
Vent km/jour	Distance de la culture verte du côté exposé au vent m				Distance de la jachère sèche du côté exposé au vent m				
Léger < 175	0	0,55	0,65	0,75	0	0,7	0,8	0,85	
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,6	0,7	0,8	
	100	0,7	0,8	0,85	100	0,55	0,65	0,75	
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,5	0,6	0,7	
Modéré 175-425	0	0,5	0,6	0,65	0	0,55	0,75	0,8	
	10	0,6	0,7	0,75	10	0,55	0,65	0,7	
	100	0,65	0,75	0,8	100	0,5	0,6	0,65	
	1000	0,7	0,8	0,8	1000	0,45	0,55	0,6	
Fort 425-700	0	0,45	0,5	0,60	0	0,6	0,65	0,7	
	10	0,55	0,6	0,65	10	0,5	0,55	0,65	
	100	0,6	0,65	0,7	100	0,45	0,5	0,6	
	1000	0,65	0,7	0,75	1000	0,4	0,45	0,55	
Très fort > 700	0	0,4	0,45	0,5	0	0,5	0,6	0,65	
	10	0,45	0,55	0,6	10	0,45	0,5	0,55	
	100	0,5	0,6	0,65	100	0,4	0,45	0,5	
	1000	0,55	0,6	0,65	1000	0,35	0,4	0,45	

2. - Bac Colorado.

Bac Colorado enténé	CAS A } Bac environné d'une culture verte courte				CAS B } Bac environné d'une jachère sèche				
	HR Moyenne %		Faible < 40	Moyenne 40-70	Fort > 70		Faible < 40	Moyenne 40-70	Fort > 70
Vent km/jour	Distance de la culture verte du côté exposé au vent m				Distance de la jachère sèche du côté exposé au vent m				
Léger < 175	0	0,75	0,75	0,8	0	1,1	1,1	1,1	
	10	1,0	1,0	1,0	10	0,85	0,85	0,85	
	100	1,1	1,1	1,1	100	0,75	0,75	0,8	
					1000	0,7	0,7	0,75	
Modéré 175-425	0	0,65	0,7	0,7	0	0,95	0,95	0,95	
	10	0,85	0,85	0,9	10	0,75	0,75	0,75	
	100	0,95	0,95	0,95	100	0,65	0,65	0,70	
					1000	0,6	0,6	0,65	
Fort 425-700	0	0,55	0,6	0,65	0	0,8	0,8	0,8	
	10	0,75	0,75	0,75	10	0,65	0,65	0,65	
	100	0,8	0,8	0,8	100	0,55	0,6	0,65	
					1000	0,5	0,55	0,6	
Très fort > 700	0	0,5	0,55	0,6	0	0,7	0,75	0,75	
	10	0,65	0,7	0,7	10	0,55	0,6	0,65	
	100	0,7	0,75	0,75	100	0,5	0,55	0,6	
					1000	0,45	0,5	0,55	

1. Dans le cas de vastes étendues de sols en jachère nue et en l'absence de toute mine en valeur agricole, réduire les valeurs K en bac de 20% par temps chaud et venteux, et de 5 à 10% quand le vent, la température et l'humidité sont modérés.

On établit une relation entre l'évaporation du bac ( $E_{bac}$ ) et l'évapotranspiration d'une culture de référence et que nous appellerons l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette culture de référence consiste en une couverture herbacée, dense et courte (10-15 cm) située dans un sol dont le contenu en humidité est suffisamment élevé pour ne pas constituer un frein au transfert de l'eau du sol dans l'atmosphère, via le sol et la plante, croissant activement (fertilité optimale du sol) et exempt de maladie.

Pour appliquer cette relation entre  $E_{bac}$  et ETP, on utilise des coefficients de bacs ( $K_b$ ) qui reflètent l'effet du climat sur la culture de référence. On a donc que:

$$ETP = K_b \times E_{bac} \quad [7.4]$$

On détermine la valeur du coefficient du bac ( $K_b$ ) en tenant compte du climat et des saisons. Pour un site donné,  $K_b$  variera d'un mois à l'autre (Pair et al., 1975).

Pour les régions où les valeurs locales de  $K_b$  ne sont pas connues, comme par exemple au Rwanda, Doorenbos (1975) propose une méthode pour estimer la valeur de  $K_b$  en fonction de l'humidité relative, du vent et de l'environnement immédiat du bac. Le tableau 7.1, extrait du bulletin de la FAO, donne les valeurs de  $K_b$  suggérées pour un bac de Classe A en fonction du couvert végétal environnant, du vent et de l'humidité relative. Par contre, la présence d'un grillage au dessus du bac de Ruhengeri peut réduire  $E_{bac}$  dans une proportion pouvant atteindre 10%.

On retrouvera au tableau 7.2 les valeurs de  $K_b$  applicables pour chaque mois considéré et qui sont tirées des valeurs recommandées par la FAO.

TABLEAU 7.2:EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE A PARTIR DU BAC STANDARD DE RUHENGERI

STATION:RUHENGERI-ABRO		EVAPORATION MENSUELLE DU BAC (mm/jour)											
ALT. :1878 m.		BAC U.S.Standard											
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	
1979				2.35	1.80	2.24	2.63	2.56	2.86	2.88	2.35	2.54	
1980	2.61	3.08		2.38	2.20	2.22	2.69	2.17	2.66	2.87	2.67	2.67	
1981	2.41	3.10	3.19	2.51	2.62	2.71	2.44	2.81	3.45	3.34	2.97	2.75	
1982	3.14	3.04	3.52	2.98	2.15	2.73	3.28	3.24	2.85	2.00	2.23	2.70	
1983	3.15	3.34	2.93	2.60	2.35	2.66	2.98	2.33	3.77	2.86	2.38	2.48	
1984	2.55	2.65	2.84	2.41	2.37	3.02	2.53	2.72	3.19	2.50	2.20	2.90	
1985	3.14	2.73	2.88	2.54	2.23	2.31	2.67	2.81	2.22	2.72	2.77	3.03	
1986	2.98	2.81	2.62	2.20	2.65	2.96	3.48	4.37	3.28	3.23	2.98	2.53	
1987	2.69	3.50	3.54	2.63	2.58	2.36	3.57	3.68	2.76	3.81			
MOY.	2.83	3.03	3.08	2.51	2.33	2.58	2.92	2.97	3.00	2.91	2.57	2.70	
STD.	0.28	0.28	0.33	0.21	0.26	0.29	0.40	0.66	0.44	0.49	0.30	0.18	
NSRE	8	8	7	9	9	9	9	9	9	9	8	8	
TEMP.C	17.6	17.2	16.7	17.8	17.7	17.0	17.0	18.2	17.9	18.0	17.1	17.1	
Rh %	76.8	78.6	82.5	84	81.5	76.9	68.9	65.2	73.4	74.7	77.7	77.8	
VENT Km/jr	161	164	162	170	165	178	188	200	203	192	182	168	
Kb	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.75	0.70	0.70	0.75	0.75	0.75	0.85	
ETP(mm/j)	2.41	2.58	2.61	2.14	1.98	1.93	2.04	2.08	2.25	2.18	1.93	2.30	TOTAL
STD.	0.24	0.23	0.28	0.18	0.22	0.22	0.28	0.46	0.33	0.36	0.22	0.15	-----
ETP(mm)	75	72	81	64	61	58	63	64	68	68	58	71	803
ETP Karawa	127	126	128	115	120	132	144	162	153	148	116	121	1592

Notes: -les données sur la vitesse du vent proviennent de la station Rubona  
 -le bac est environné d'une culture verte courte sur 10 m. du côté du vent  
 -l'humidité relative moyenne est égale à (Rhmax + Rhmin)/2

On trouve ensuite l'évapotranspiration potentielle ETP en appliquant l'équation 7.4. On remarquera que ETP mensuelle moyenne est calculée à partir de Ebac mensuelle moyenne telle que mesurée depuis 1979. L'erreur standard sur ETP est également déduite au prorata de l'erreur standard sur les mesures de Ebac.

Finalement, on trouve au Tableau 7.2 que l'évapotranspiration potentielle annuelle calculée à partir du bac de Ruhengeri totalise 803 mm. Si nous comparons cette valeur avec celle obtenue par le bac de la station de Karama (bac de Colorado) et qui totalise 1592 mm., nous sommes en droit de penser que les données de Ruhengeri sous-évaluent l'évapotranspiration et ce, pour une raison fort simple: la position du bac par rapport aux lacs Ruhondo et Bulera. En effet, les vents dominants soufflent d'Est en Ouest, saturant ainsi les masses d'air qui passent ensuite au-dessus de Ruhengeri et, par conséquent, du bac. Le pouvoir évaporant de l'air est donc réduit d'autant, ce qui rend difficile l'utilisation de coefficients normalisés pour le calcul de l'évaporation des lacs et de l'évapotranspiration du bassin versant des marais Rugezi, situé à "l'amont" des lacs. Notons que dans la littérature, on recommande notamment de localiser les bacs du côté des vents dominants par rapport aux lacs ou réservoirs de superficie importante.

Cette situation nous oblige donc à mettre de côté la méthode du bac pour estimer l'évapotranspiration réelle du sous-bassin Rugezi.

### **7.1.2 Méthode Penman modifiée**

La formule de Penman est une des formules les plus utilisées pour déterminer l'évapotranspiration potentielle (ETP) des cultures.

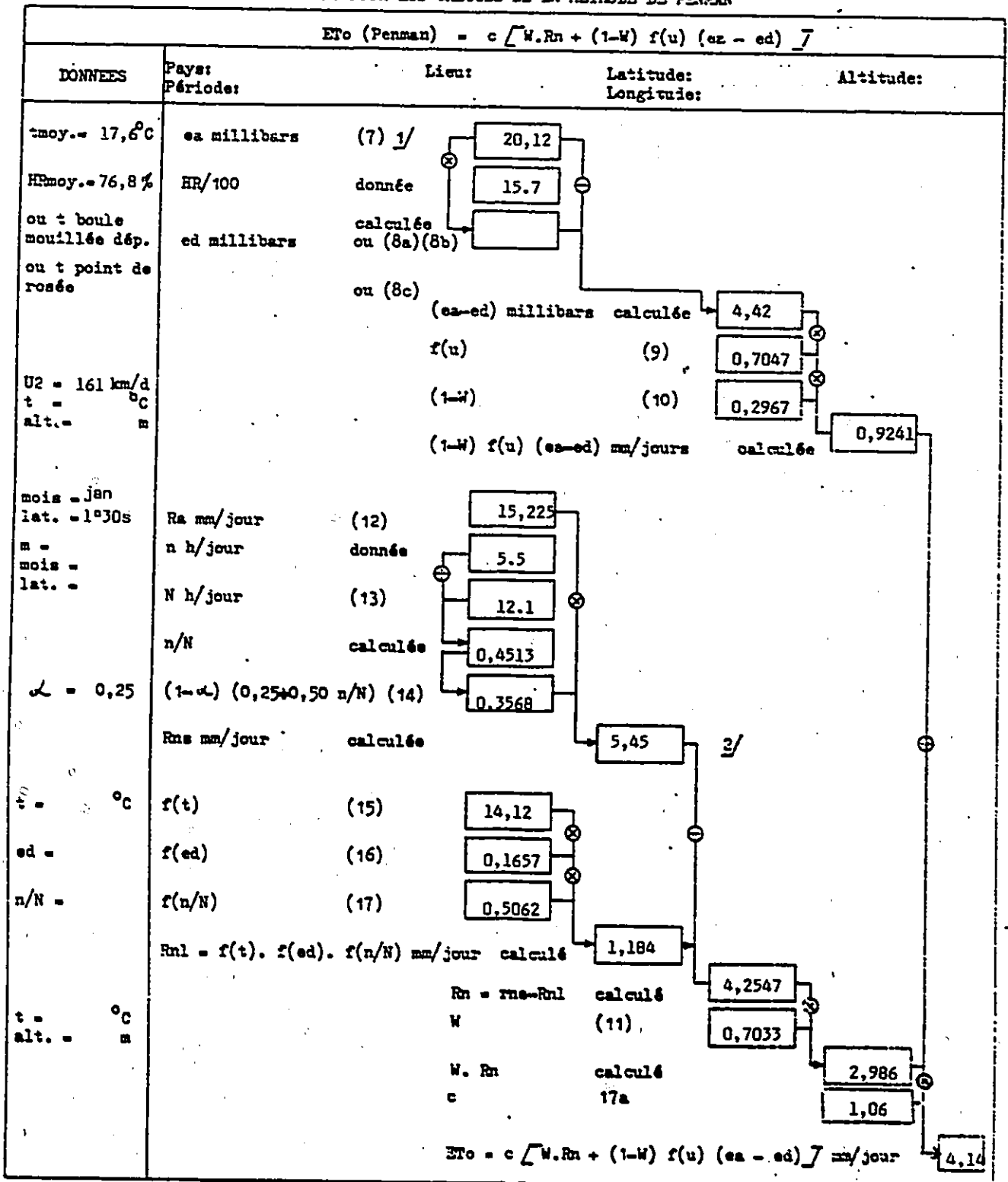
Sa célébrité provient du fait qu'il s'agit de la première formule rationnelle à être largement diffusée pour la détermination de ETP. Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette méthode fait appel à une combinaison des méthodes du bilan énergétique et de l'approche aérodynamique pour le calcul de l'évapotranspiration. Pour les besoins de l'analyse, nous appliquerons ici la méthode de Penman modifiée telle que présentée par Doorenbos et la FAO (1975).

Partant des données moyennes de température, d'humidité et d'insolation à Ruhengeri, de même que du vent de la station de Rubona, nous avons compilé le tableau 7.3 qui donne l'évapotranspiration potentielle pour chaque mois de l'année, calculée suivant la méthode de Penman.

L'utilisation des données de vent de la station de Rubona se justifie d'une part parce que les vents sont relativement stables et faibles au Rwanda (160 @ 205 km/heure sur le plateau et 178 @ 221 km/heure en montagne) (Griffiths, 1972), et que les résultats de Merva et al., (1982) montrent que pour des variations très importantes de la vitesse du vent (96 à 252 km/jour), la variation de ETP n'est que de 2%.

On trouvera à la figure 7.2 un exemple de calcul de ETP suivant la formule de Penman modifiée. L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée suivant cette méthode totalise 1436 mm. à Ruhengeri, ce qui est comparable aux données de la station Karama (1592 mm). Nous retiendrons donc la méthode de Penman plutôt que celle du bac pour le calcul subséquent de l'évapotranspiration réelle et la détermination de l'évapotranspiration attribuable aux marais.

FIG 7.2 : MODELE POUR LES CALCULS DE LA METHODE DE PENMAN



1/ Les chiffres entre parenthèses renvoient au Tableau correspondant.

2/ Quand on connaît les données Rn, Rne = 0,75 Rn.



Dans cette optique, nous avons recalculé au Tableau 7.3a l'ETP mensuelle en fonction du sous-bassin de Rugezi en considérant, d'une part, la moyenne des températures entre les stations Rwerere et Ruhunde, et d'autre part, en prenant les données de vitesse du vent et l'humidité à partir d'une station d'altitude équivalente, soit celle de Kisozi. Cet ajustement ramène l'évapotranspiration potentielle pour le sous-bassin Rugezi à 1342 mm par année.

### **7.1.3 Calcul de l'évapotranspiration réelle**

L'emploi de la méthode de Penman devient ici intéressante, puisqu'elle permet de discrétiser les surfaces de culture du bassin versant et ensuite de transformer l'évapotranspiration potentielle (ETP) en évapotranspiration réelle (ETR), tout en tenant compte du stade de croissance des cultures. La justesse de la méthode repose sur le fait qu'on assume que le sol fournit suffisamment d'eau aux plantes pour que l'évapotranspiration soit optimale. Dans le cas du Rwanda, cette hypothèse est en grande partie satisfaite puisque les pluies y sont à la fois abondantes et fréquentes. Seuls les mois de juin, juillet et août sont secs et, heureusement, cette époque correspond aux périodes de récolte, où le besoin en eau des plantes devient négligeable.

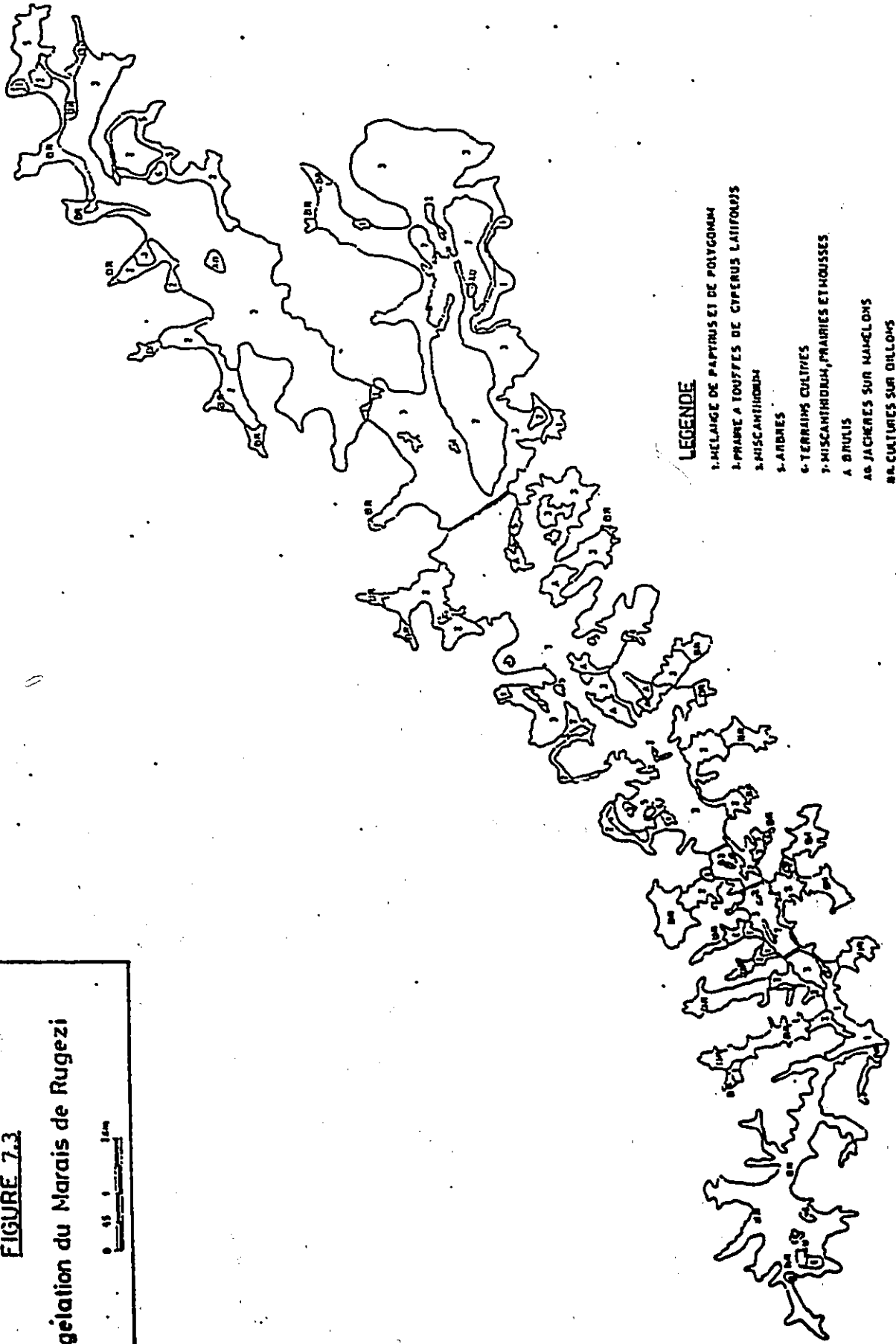
Pour fins de calcul, la discrétisation du bassin versant s'est faite en fonction de l'utilisation du sol. Nous avons retenu trois types de sols, soit:

- Versants cultivés traditionnellement ( $A_v = 9366$  ha);
- Marais cultivés ( $A_{mc} = 1623$  ha);
- Marais non cultivés ( $A_m = 3772$  ha).

Le calcul des superficies pour chaque type d'utilisation de sol a été établi à partir de relevés d'occupation des sols récemment publiés au Rwanda (annexe E) et qui sont reportés à la figure 7.3.

**FIGURE 7.3**

**Végétation du Marais de Rugezi**



**LEGENDE**

- 1-MELANGE DE PAPIRUS ET DE POLYCOMM
- 2-PRAIRIE A TOUFFES DE CYPERUS LAIIFORDIS
- 3-MISCANTHIDUM
- 4-ANDRES
- 5-TERRAINS CULTIVES
- 6-MISCANTHIDUM, PRAIRIES ET MOUSSES
- 7- BRULIS
- 8A-JACHERES SUR MAMELONS
- 8B-CULTURES SUR DILLOMS

Source: Weber et al., 1987.

Évapotranspiration réelle des versants cultivés (ETR<sub>v</sub>):

A partir des relevés cités plus haut et d'études faites dans le cadre du project RRAM, nous avons établi que les terres cultivées sur les versants des marais Rugezi sont occupées de la façon suivante au cours de l'année:

- jachères: 20%
- haricots: 26%
- pommes de terre et patates douces: 19%
- maïs: 18%
- sorgho: 10%
- pois: 6%
- blé : 2%

Pour chacune de ces cultures, un coefficient cultural K<sub>c</sub> a été défini suivant les recommandations de la FAO d'où nous avons par la suite déduit un facteur K<sub>c</sub> équivalent pour chaque mois (tableau 7.4). Rappelons qu'il y a deux saisons de culture au Rwanda, soit de février à juin, et de septembre à décembre. On remarquera que le coefficient cultural équivalent K<sub>c</sub> est faible en juillet, août et janvier et que cette situation s'accorde bien avec la réalité. Ainsi, même si l'évapotranspiration potentielle est importante durant les mois de juin, juillet et août, l'évapotranspiration réelle (ETR) est fortement réduite à cause de la saison sèche et du manque d'eau pour satisfaire le besoin des plantes. Seules les jachères contribuent alors à l'évapo- transpiration avec un facteur K<sub>c</sub> de 0,55, tel que suggéré par la FAO.

On aura donc que:

$$ETR = K_c \text{ équi.} \times ETP \quad [7.5]$$

où = K<sub>c</sub> équi. est le coefficient cultural pondéré en fonction des superficies respectives de chaque culture.

Sur une base annuelle, nous obtenons au Tableau 7.4 que pour les versants cultivés ETR = 754 mm.

TABLEAU 7.4:

COEFFICIENTS CULTURAUX SAISONNIERS-Kc  
BASSINS VERSANTS DU SOUS-BASSIN RUGELI

%	CULTURE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	
20	JACHERES	0.80	0.95	1.05	1.05	1.05	0.80	0.55	0.55	0.80	0.95	1.05	0.95	
26	HARICOTS SECS	0.10	0.30	0.70	1.05	0.65	0.25			0.30	0.70	1.05	0.65	
19	POMMES DE TERRE	0.10	0.40	0.70	1.05	0.95	0.70			0.70	1.05	0.85	0.70	
18	MAIS	0.10	0.70	1.05	1.05	0.80	0.55			0.70	1.05	0.80	0.55	
2	BLE	0.10	0.70	1.05	1.05	0.65	0.20			0.70	1.05	1.05	0.65	
10	SORGHO	0.10	0.30	0.70	1.00	0.75	0.50			0.30	0.70	1.00	0.75	
6	POIS	0.10	0.40	0.70	1.05	1.00	0.95			0.40	0.70	1.05	0.95	
	Kc équivalent	0.24	0.53	0.84	1.05	0.85	0.57	0.11	0.11	0.56	0.88	0.96	0.73	
	PENMAN													
	ETP(mm)	124	107	110	72	84	89	132	160	134	125	109	96	TOTAL
	ETRv(mm)	30	57	92	75	71	35	14	18	75	110	105	70	754

TABLEAU 7.5:

COEFFICIENTS CULTURAUX SAISONNIERS-Kc  
MARAIS CULTIVES

%	CULTURE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	
20	JACHERES	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
39	HARICOTS VERTS		0.30	0.65	0.95	0.90			0.30	0.65	0.95	0.90		
14	POMMES DE TERRE	0.40	0.70	1.05	1.05	0.85	0.70	0.40	0.70	1.05	1.05	0.85	0.70	
5	MAIS	0.30	0.70	1.05	1.05	0.80	0.50	0.30	0.70	1.05	1.05	0.80	0.50	
22	PATATES DOUCES	0.40	0.70	1.05	1.05	0.85	0.70	0.40	0.70	1.05	1.05	0.85	0.70	
	Kc équivalent	0.36	0.60	0.88	1.00	0.90	0.48	0.36	0.60	0.88	1.00	0.90	0.48	0.70
	PENMAN													
	ETP(mm)	124	107	110	72	84	89	132	160	134	125	109	96	TOTAL
	ETRmc(mm)	44	64	98	72	76	42	47	97	118	125	98	46	928

Si nous comparons cette valeur annuelle avec celle obtenue en employant la méthode de Turc, qui utilise une relation empirique de la forme:

$$ETR = \frac{P}{[0,90 + (P + I_t)^2]^{0.5}} \quad (\text{mm/an}) \quad [7.6]$$

où:  $P$  = Précipitation annuelle = 1215 mm.

$$I_t = 300 + 25T + 0,05T^3$$

$T$  = Température annuelle moyenne = 16.2 C.,

nous obtenons que:

$$ETR = \underline{746 \text{ mm/an}} \quad [7.7]$$

Soulignons que la méthode de Turc a été établie à partir des données de 254 bassins versants localisés dans toutes les parties du monde et en particulier en Europe et en Afrique de l'ouest.

Le fait que les méthodes de Turc et de Penman donnent des résultats identiques nous confirme donc dans le choix de la méthode de Penman pour valider notre équation de bilan hydrique. De plus, en utilisant la méthode de Penman, nous pouvons discrétiser le bassin versant et isoler la composante "Tourbière".

Il faut cependant tenir compte de l'évapotranspiration attribuable aux arbres. Ceux-ci couvrent une superficie évaluée à environ 1.5 ha/km<sup>2</sup> et sont constitués à plus de 60% d'eucalyptus dispersés sur les parcelles de cultures. Suivant des études de Starosolszky (1987), on sait que l'évapotranspiration des arbres varie entre 2.35 et 4.7 mm/jour. D'autre part, Greenwood et al., (1985) ont démontré que, exprimée en % de la précipitation annuelle, l'évapotranspiration était de 60% pour une prairie et de 240 à 400% pour des eucalyptus. En prenant une valeur moyenne de 300% et en l'appliquant à la superficie couverte par les arbres (1.5%), nous obtenons que l'évapotranspiration

attribuable aux arbres est de 55mm. par an. Si nous ajoutons cette valeur à celle trouvée en 7.7, nous aurons que l'évapotranspiration réelle des versants (ETRv) sera égale à 801 mm/an.

Évapotranspiration réelle des marais cultivés et drainés (ETRmc):

A la différence des cultures situées sur les versants des marais, les cultures dans les marais bénéficient d'apports en eau du sol qui sont continuels tout au cours de l'année.

Reprenant l'approche citée plus haut mais en tenant compte des cultures utilisées en marais et qui sont différentes de celles des versants, nous avons établi au Tableau 7.5 que pour les marais cultivés,  $ETR_{mc} = 928$  mm/an. Cette valeur se rapproche sensiblement de ETR calculée suivant Thorntwaite pour une culture verte courte à Kisoru au Rwanda et qui totalise 922 mm/an (Griffiths et al., 1972).

Évapotranspiration des marais non cultivés: (ETR<sub>m</sub>)

La méthode de la FAO ne présente pas de coefficients cultureux pour la végétation des marais et tourbières puisqu'il ne s'agit pas de cultures au sens propre du terme. Par contre avec les informations dont nous disposons maintenant il est possible d'estimer un tel paramètre applicable sur une base annuelle. Partant de la relation suivante où:

$$ET = \frac{A_m}{A_t} \times ETR_m + \frac{A_{mc}}{A_t} \times ETR_{mc} + \frac{A_v}{A_t} \times ETR_v \quad [7.9]$$

et où:  $ET = P - R$  [équation 7.2]  
 $= 980$  mm/an [7.3]

$A_t =$  Superficie totale du sous-bassin Rugezi

donc:  $ETR_m = (A_t \times ET - A_{mc} \times ETR_{mc} - A_v \times ETR_v) + A_m$  [7.9a]

$= (14761 \times 980 - 1623 \times 996 - 9336 \times 801) + 3772$  [7.9b]

$ETR_m = 1447$  mm/an. [7.9c]

$= 4$  mm/jour.

Cette valeur se compare très bien avec des résultats obtenus ailleurs et présentés au tableau 7.6.

$$\text{Et finalement, } K_c (\text{marais}) = \frac{\text{ETR}_m}{\text{ETP}} = 1.08 \quad [7.10]$$

Cette valeur tend à démontrer que l'évapotranspiration des marais Rugezi est sensiblement égale à l'évapotranspiration potentielle et que ce qui gouverne l'évapotranspiration des tourbières, c'est tout d'abord la quantité constante d'eau disponible pour les plantes plutôt que le type de végétation.

## 7.2 Equation détaillée du bilan du sous-bassin Rugezi

Reprenant les équations 7.3 et 7.9, nous pouvons écrire l'équation du bilan hydrique du sous-bassin Rugezi, mais cette fois en y incluant la partie du bassin versant qui se déversait jusqu'en mai 1987 par l'exutoire Fels. Cette ajout modifiera le ruissellement sortant de Rugezi de la façon suivante:

$$R_r = P - \frac{A_m}{A_t} \times \text{ETR}_m - \frac{A_{mc}}{A_t} \times \text{ETR}_{mc} - \frac{A_v}{A_t} \times \text{ETR}_v \quad [7.1]$$

$$\text{où} : R_r = 1215 - \frac{5354}{19426} \times K_c \times 1342 - \frac{1623}{19426} \times 928 - \frac{12448}{19426} \times 801$$

$$R_r = 624 - 370 \times K_c \text{ mm/an.} \quad [7.2]$$

où pour:  $K_c = 1.08$

$$R_r = 224 \text{ mm/an}$$

donc  $V_r = 43.6$  millions de  $m^3$  par année.

Si on considère qu'avant la fermeture de l'exutoire Fels le volume annuel d'eau transitant par Rusumo/Rugezi était de 35 millions de m<sup>3</sup>/an, on constate alors que la fermeture de Fels aura comme impact une augmentation de 25% du volume de ruissellement à l'exutoire Rusumo/Rugezi. Il est actuellement trop tôt pour comparer ce résultat avec ceux de la station de jaugeage de Rugezi. Une telle vérification serait cependant souhaitable lorsqu'un cycle hydrologique sera complété (janvier 89).

Tableau 7.6

Evapotranspiration maximale en milieu humide

Endroit	Type d'écosystème	ETP (mm/jr)	Mois	Méthode de mesure	Chercheur
URSS	Tourbière basse	3.8	Mai	Bilan énergie	Romanov (1968)
Dakota Nord	Marais	4.0	Juillet	Bilan hydrique	Eisenlohr (1966)
Ontario, Canada	Tourbière boisée	4.6	Août	Bilan énergie	Munro (1979)
Ouganda	Marais de papyrus	4.8	Avril	Bilan énergie	Rijks (1969)

Source: Dolan et al., 1984.

### 7.3 Variations mensuelles de l'évapotranspiration des tourbières

Au-delà du fait que la méthode du bilan hydrique est précise lorsqu'appliquée sur une base annuelle, nous avons tenté de reproduire sur une base mensuelle, les variations de l'évapotranspiration des tourbières du Rugezi. Nous avons alors reformulé l'équation du bilan hydrique de la façon suivante:

$$R_i = P_{j-i} - \frac{A_m}{A_t} \times ETR_{mi} - \frac{A_{mc}}{A_t} \times ETR_{mci} - \frac{A_v}{A_t} \times ETR_{vi} + S_i \quad [7.11]$$

où :  $i$  = indice mensuel ( $i = 1$  à  $12$ )

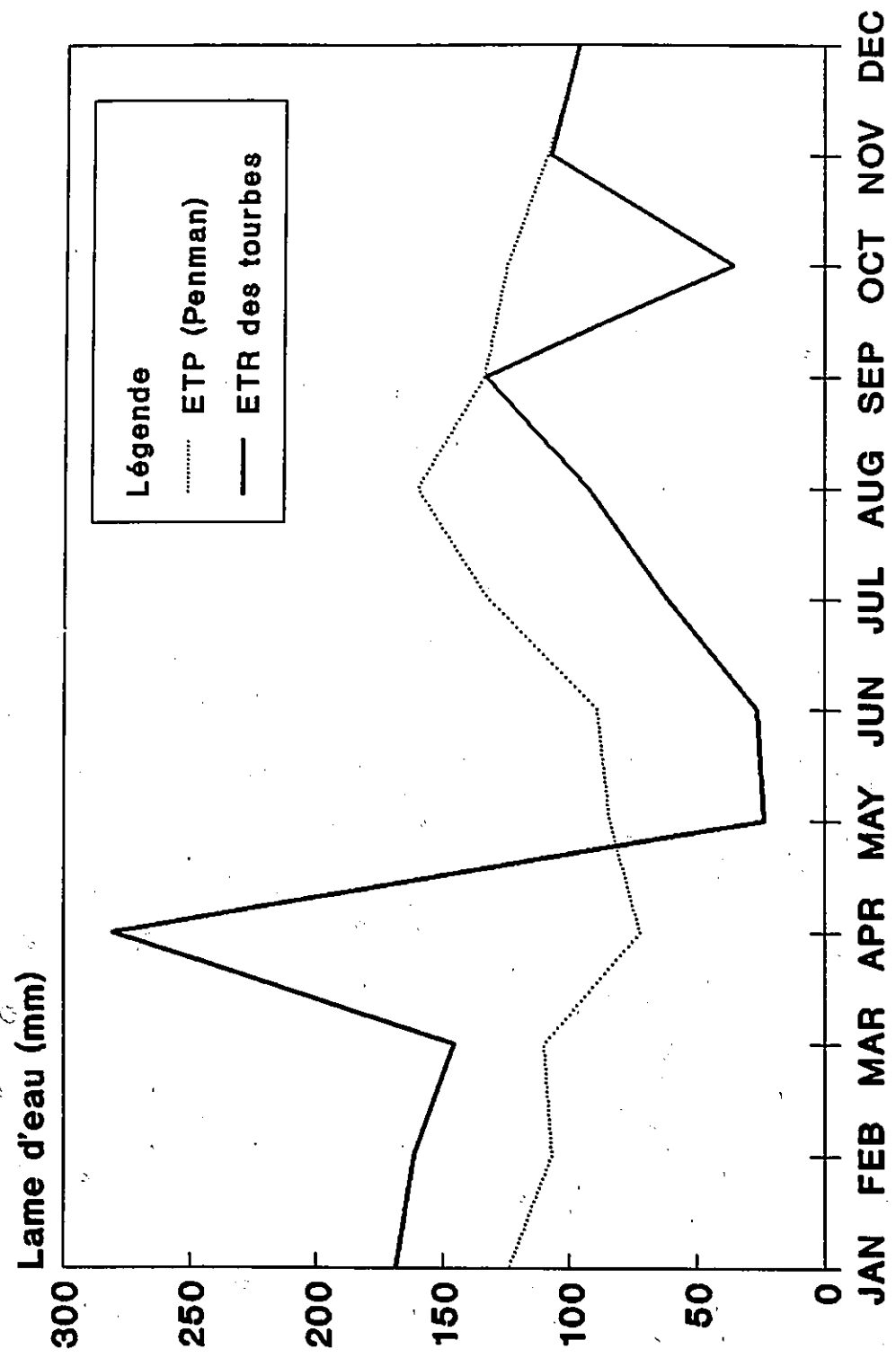
Cette relation tient compte du fait que le temps de réponse entre ruissellement et précipitation est d'environ 1 mois dans les conditions naturelles d'écoulement au travers de la tourbière (Figure 8.4). C'est pourquoi nous imputons le ruissellement à la précipitation du mois précédent.

Pour tenir compte des phénomènes de stockage de l'eau dans le sol, nous avons posé qu'en raison des fortes pentes sur les versants, le stockage était nul (Alford, 1985). Par contre, dans la tourbière nous avons déduit les variations du niveau de la nappe à partir des mesures de la jauge limnimétrique. Pour chaque mois, nous avons calculé les différences de volume d'eau stockée dans les tourbes en considérant que la porosité de ces tourbes, selon Jatou (1977), varie entre 52 et 83%, tandis que la capacité de rétention d'eau de ces mêmes tourbes varie entre 40 et 70%. Nous avons retenu un taux de rétention de 50% après une analyse de sensibilité.

Ces calculs nous ont permis d'établir le profil de variation mensuelle de l'évapotranspiration réelle montrée à la figure 7.4. L'utilisation de cette courbe est cependant sujette à caution à cause des imprécisions sur les variations du volume d'eau retenue dans les tourbes. Nous ne recommandons pas l'utilisation de cette figure pour déterminer des coefficients culturaux applicables mensuellement, par exemple.

Par contre, la forte montée de l'évapotranspiration des tourbes durant la saison des pluies recoupe des constatations déjà faites par Romanov (1968), et semble indiquer une grande activité de croissance végétative.

**FIGURE 7.4**  
**EVAPOTRANSPIRATION DES TOURBIERES**  
**VARIATIONS MENSUELLES**



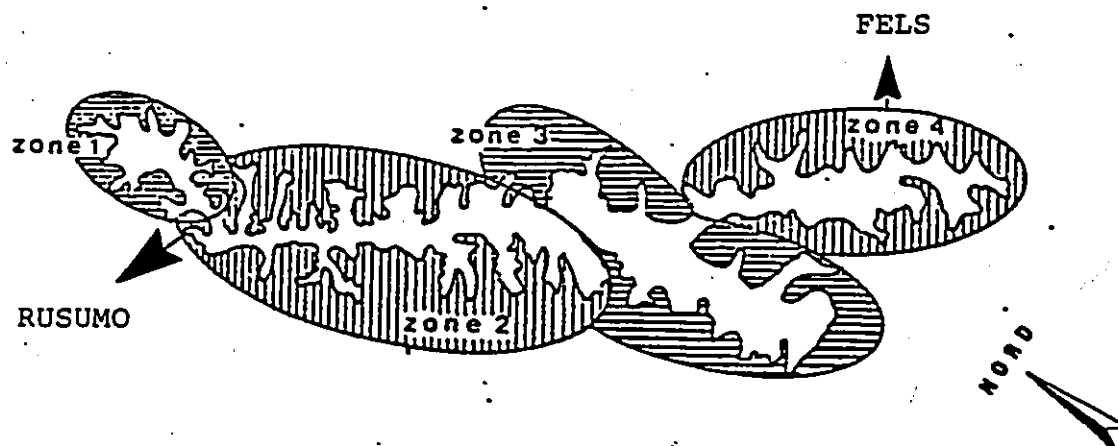
## **8.0 IMPACT DE L'UTILISATION HYDRO-AGRICOLE DES MARAIS SUR LE POTENTIEL HYDRO-ÉLECTRIQUE DE LA MUKUNGWA**

L'utilisation hydro-agricole des marais de Rugezi et Kamiranzovu peut influencer sur le régime hydrique du bassin de la rivière Mukungwa de trois façons. D'une part, la dérivation de l'eau d'une partie des marais vers d'autres bassins versants se traduira par une diminution correspondante du volume d'eau disponible pour la production hydro-électrique. On n'a qu'à penser ici à la dérivation des eaux à l'exutoire Fels (Nyagafunzo), réalisée vers les années 1940 et qui déviait les eaux de la zone 4 de la figure 8.1 vers le bassin de la rivière Mulindi. Depuis mai 1987, l'Electro-gaz a fermé cet exutoire, ce qui se traduit par une augmentation de plus de 30% de la superficie drainée par le sous-bassin Rugezi avec, comme conséquence, une hausse de 25% de débits à l'exutoire Rusumo.

Un deuxième effet de l'utilisation hydro-agricole des marais réside dans les changements d'utilisation des sols qu'un tel programme entraîne, et qui influenceront sur l'évapotranspiration réelle des marais. A l'heure actuelle, le marais Kamiranzovu (Zone 1, figure 8.1), d'une superficie de 625 hectares, est exploité en bonne partie pour des fins agricoles, mais on compte encore au moins 5350 hectares de tourbières non aménagées. L'utilisation hydro-agricole de ces tourbières impliquera un changement d'occupation du sol qui se reflètera par une diminution des pertes par évapotranspiration et une augmentation du ruissellement.

Finalement, un autre aspect de l'utilisation hydro-agricole des marais qui peut influencer sur le potentiel hydro-électrique du bassin de la Mukungwa, c'est l'impact du drainage proprement dit. Présentement, la partie non-aménagée des marais se caractérise par l'absence de réseaux hydrographiques, c'est à dire de canaux d'écoulement des eaux de surface. Ceci a pour effet d'amortir et de régulariser les eaux traversant les marais. Toute action de drainage modifiera l'effet de tampon exercé par le marais dans son état actuel.

FIG 8.1 : Découpage du sous-bassin Ruzezi



Ce découpage décompose la superficie totale de la cuvette de la manière suivante :

ZONE	Superficie en ha		
	Karais	Bassin versant	Total
I	652	2.592	3.244
II	2.526	4.372	6.898
III	2.217	2.402	4.619
IV	1.582	3.082	4.664
	6.977	12.448	19.425

SOURCE : Sctet/Coop 1970.

Nous allons voir plus en détail chacun de ces aspects.

### **8.1 Impact de la fermeture de l'exutoire Fels sur le potentiel hydro-électrique du bassin de la Mukungwa**

Depuis mai 1987, l'Electro-gaz a fermé l'exutoire Fels, ce qui a eu pour conséquence directe d'accroître le débit sortant des marais à Rusumo. Il faudra encore un certain temps avant d'avoir des mesures précises de cette hausse de débits. Néanmoins, en appliquant l'équation du bilan hydrique à l'ensemble du bassin Rugezi, y compris la zone 4 de la (figure 8.1), nous pouvons estimer l'impact qu'aura la fermeture de l'exutoire Fels sur le potentiel hydro-électrique à l'aval du marais.

Rappelons ici que ce potentiel hydro-électrique est constitué des deux centrales hydro-électriques existantes de Ntaruka et Mukungwa I, de la centrale Mukungwa II déjà à l'étude, et d'une centrale projetée aux chutes des marais (Rusumo/Rugezi). Les réservoirs formés par les lacs Bulera (200 millions de m<sup>3</sup>) et Ruhondo (90 millions de m<sup>3</sup>) ont de dimensions telles qu'ils absorberont entièrement les augmentations de débit imputables au développement hydro-agricole des marais et à la fermeture de l'exutoire Fels. Nous estimons en effet, cette augmentation à 7,6 millions de m<sup>3</sup> par année, soit moins de 2.5% du volume de réserve active.

Les capacités de production des centrales de Ntaruka et de Mukungwa I et II sont déjà connues. Pour Rusumo/Rugezi, il n'existe pas d'études détaillées du site; nous avons donc posé un certain nombre d'hypothèses afin d'établir la capacité de production moyenne de cette future centrale. Ces hypothèses sont:

- Un débit minimum de 320 litres par seconde doit être maintenu dans la rivière Rugezi pour des fins environnementales et esthétiques. Ce débit correspond au débit minimum mesuré à la station Rugezi.
- Efficacité des turbines de 0,84 (comme aux autres centrales).
- Hauteur de chute brute de 170 mètres, (suivant les cartes topographiques à l'échelle 1:50 000).
- Les installations seront conçues pour absorber 85% des débits mensuels moins le débit écologique de 320 litres par seconde.

A partir de ces hypothèses, nous avons calculé à l'annexe H la puissance et l'énergie moyennes disponibles au site de Rugezi. La méthode de calcul s'appuie sur les recommandations de l'EPRI (1981).

En comparant l'énergie annuelle moyenne avec et sans Fels, nous avons pu ainsi chiffrer, au Tableau 8.1, l'impact qu'aura la fermeture de la dérivation Fels sur le potentiel hydro-électrique de chacune des centrales. On y constate que la fermeture de Fels augmentera le potentiel énergétique total de la rivière Mukungwa de 7.5 Gwh environ, et que cette augmentation se fera surtout sentir à la future centrale Rugezi.

Cette valeur a été obtenue à partir des volumes effectifs d'eau provenant de Rugezi et disponibles pour le turbinage aux centrales. Pour la centrale Rugezi nous avons donc soustrait un débit écologique égal à 320 litres/sec, de même que l'excédent du débit maximum correspondant à 15% de dépassement sur la courbe des débits classés (Annexe H). Pour les autres centrales, nous avons soustrait, du volume additionnel provenant de Fels, l'équivalent des pertes par évaporation dues à l'augmentation de la superficie des lacs Bulera et Ruhondo. L'évaporation a été calculée à partir de l'ETP de Penman en y appliquant un facteur de 0,8. On peut voir au Tableau 8.1, que ces pertes sont négligeables par rapport à l'apport global (0,25%).

TABLEAU 8.1:IMPACT DE LA FERMETURE FELS SUR LE  
POTENTIEL HYDRO-ELECTRIQUE DE LA NUKUNGWA

CENTRALE	HAUTEUR DE CHUTE m.	EFFICACITE TURBINE	SANS FELS		AVEC FELS		DIFFERENCE GWh	PRODUCTION NOMINALE GWh	ACCROISSEMENT RELATIF. %
			Vol.effectif Million m.cu	GWh	Vol.effectif Million m.cu	GWh			
RUGEZI	161	0.84	27.1	10.0	34.7	12.8	2.8	10	28
NTARUKA	101	0.84	34.7	8.0	43.5	10.1	2.0	22	9
NUKUNGWA 1	110	0.84	34.7	8.7	43.3	10.9	2.2	45	5
NUKUNGWA 2	28	0.84	34.7	2.2	43.3	2.8	0.5	16	3
TOTAL :							7.5	93	8

TABLEAU 8.2 : BENEFICES IMPUTABLES A LA FERMETURE  
DE L'EXUTOIRE FELS

CENTRALE	SURPLUS D'ELECTRICITE ATTRIBUABLE A FELS (GWh)													
	ANNEE	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
NTARUKA		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
NUKUNGWA I.		2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
NUKUNGWA II				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
RUSUMO/RUGEZI											2.8	2.8	2.8	
TOTAL		4.2	4.2	4.2	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	7.5	7.5	7.5
PRIX UNITAIRE f/kwh		10	10	11	11	12	12	12	13	13	14	14	15	16
BENEFICE millions frw		42	42	46	52	56	56	56	61	61	66	105	113	120

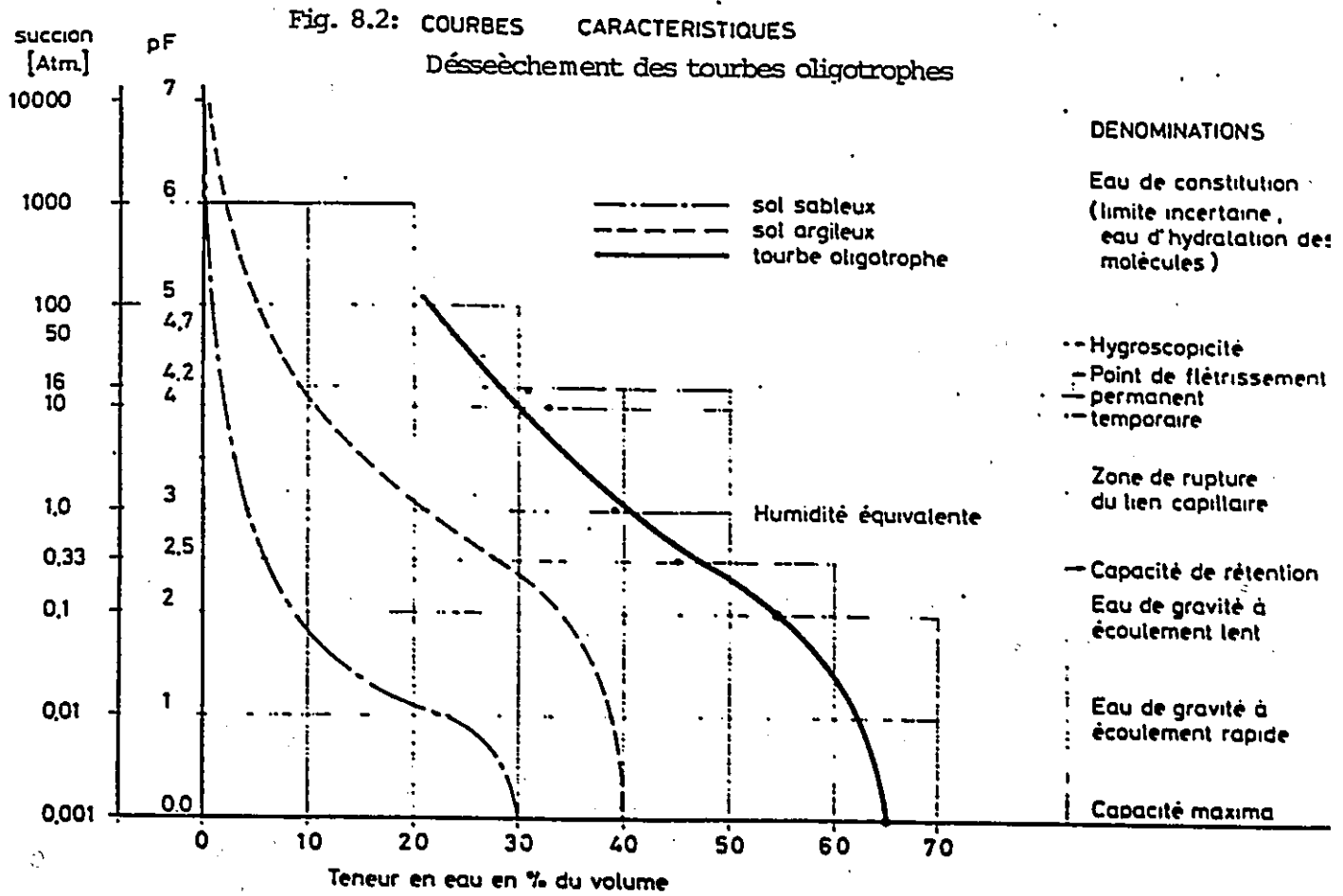
Note: -un taux d'augmentation de 3% par année a été appliqué au prix de vente d'électricité.

En terme de coût/bénéfice, la fermeture de l'exutoire Fels s'avère donc des plus rentables. On remarquera en effet au tableau 8.2 que les volumes additionnels d'eau de turbinage engendreront des ventes additionnelles d'électricité estimées à 42 millions de FRW dès 1988. Si on considère que les coûts directs pour la fermeture de Fels sont de 2.6 millions de FRW (Lombardi, 1987), on voit que l'investissement est amorti dès la première année.

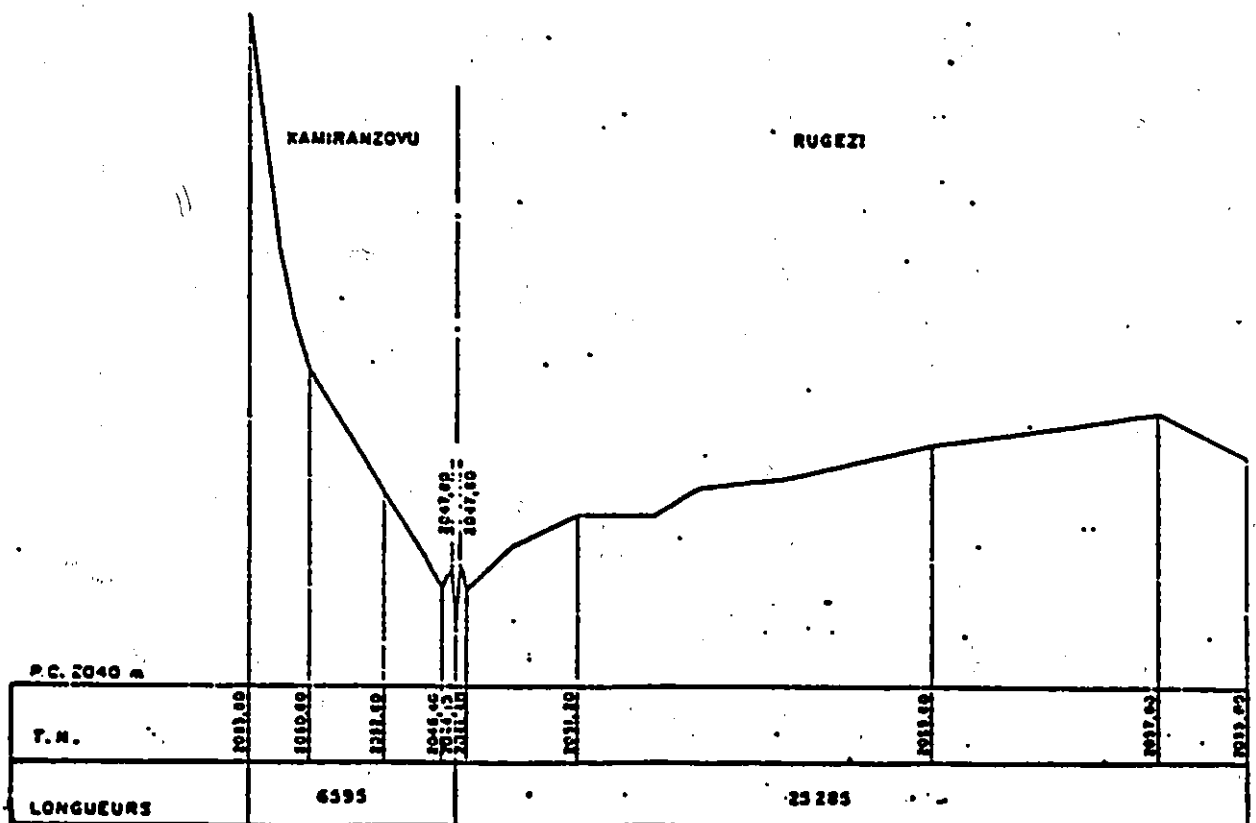
## **8.2 Impact dû à l'utilisation agricole des tourbières**

Le projet de développement hydro-agricole des marais viendra modifier la flore du marais, constituée de tourbières possédant des caractéristiques hydro-agricoles très particulières. Les études pédologiques menées par la Scet en 1970 (annexe F) ont montré que les marais sont composés surtout de sols hydromorphes organiques ou de sols tourbeux oligotrophes dont le pH varie entre 3,4 et 5,0. Une caractéristique intéressante de ce type de tourbe réside dans sa capacité maximale de rétention d'eau, c'est-à-dire la "quantité maximale d'eau que le sol peut retenir sans qu'elle s'écoule sous l'effet de la gravité" (Jaton, 1977). Pour la tourbe, cette valeur varie entre 40 et 65% comparativement à 18% pour un sol limoneux ou 8% pour du sable. (Fig. 8.2). De la même façon, le point de flétrissement de la tourbe variera entre 30 et 60%. Par contre les tourbes acides sont relativement perméables ( $K = 10^{-3} \text{ à } 10^{-5} \text{ cm/s.}$ ).

Ces éléments joueront évidemment un rôle très important dans un projet d'agriculture où l'on veut s'assurer que les cultures bénéficieront d'un apport optimal en eau. Ainsi, un drainage en profondeur des tourbes, en plus d'entraîner des problèmes de dessiccation et de tassement des tourbes sur lesquels nous reviendrons plus loin, risque de provoquer également le flétrissement des cultures durant la saison sèche si le rabattement de la nappe est trop grand.



**Fig. 8.3: Profil des tourbières du Rugezi**



Dans une optique de développement agricole, il importe de mettre à profit les caractéristiques hydrauliques des tourbes (perméabilité et capacité de rétention d'eau) afin de favoriser les productions agricoles de contre-saison. Pour y arriver, il faut contrôler le niveau d'eau de la tourbière en rabattant la nappe dans la zone des racines des plantes cultivées (0,5 à 1,0 mètre), tout en s'assurant par contre que le niveau de la nappe ne descende pas plus bas. On s'assure ainsi que les cultures bénéficieront d'eau radicaire même pendant les saisons sèches.

Nous verrons un peu plus loin l'effet que peut avoir le drainage à proprement dire sur la régime hydrique, mais arrêtons-nous tout d'abord sur les aspects de l'utilisation agricole des tourbières actuellement non-aménagées, qui couvrent près de 5380 ha. Voyons donc quelle est la superficie aménageable de ces tourbières et quel sera l'effet d'un changement d'occupation des sols sur le bilan hydrique?

### **8.2.1 Superficie aménageable**

Pour déterminer la superficie utilisable des marais, il faut tout d'abord respecter un certain nombre de contraintes, dont:

- aucune déviation des eaux hors du bassin Mukungwa n'est permise (ex. interdiction d'utiliser l'exutoire Fels).
- le drainage est superficiel et peu profond (1 mètre).
- le marais Kamiranzovu est déjà aménagé et doit être maintenu comme tel.

Nous voyons tout d'abord à la figure 8.3 montrant le profil en long des tourbières, que l'extrémité Sud-Est du marais (Hondo) ne sera pratiquement pas exploitable à cause de l'inversion des pentes probablement due à la dérivation Fels. Il faut donc soustraire de la superficie aménageable cette portion de 1582 ha de tourbière partiellement inondée. La partie encore aménageable des tourbières du Rugezi s'élève alors à quelques 3772 ha. situés dans les zones II et III de la figure 8.1.

**8.2.2 Effets dus au changements d'occupation des sols**

Selon le genre d'exploitation agricole, l'évapotranspiration réelle (ETR) variera en fonction du type de culture, des conditions d'exploitation agricole et de l'approvisionnement en eau pour les plantes. Pour les marais cultivés, nous avons déjà estimé, au tableau 7.5, des coefficients cultivaux saisonniers que nous appliquons maintenant à l'ensemble des zones exploitables du marais. Nous obtenons ainsi, au tableau 8.3, une nouvelle répartition de l'évapotranspiration annuelle ET dans le bassin Rugezi. On voit alors que les pertes annuelles par évapotranspiration passent de 980 mm/an avant aménagement (Eq. 7.3) à 889 mm/an après aménagement.

Tableau 8.3

Caractéristiques futures du sous-bassin Rugezi

Description	Superficie en ha.	Evapotranspiration réelle ETR (mm/an)
Versants des marais	$A_v = 12448$	ETR = 801
Marais cultivés	$A_{mc} = 5395$	ETR <sub>mc</sub> = 928
Marais non cultivés	$A_m = 1582$	ETR <sub>m</sub> = 1453
TOTAL	$A_t = 19425$	ET = 889 mm/an

Dans le bilan hydrique annuel, cette baisse de 91 mm/an de l'évapotranspiration se traduira par une hausse équivalente du ruissellement qui passera de 235 mm/an à 326 mm/an. On retrouvera en moyenne près de 17.7 millions de m<sup>3</sup> d'eau de plus chaque année à la sortie du marais Rugezi, sans compter l'apport additionnel causé par la fermeture de l'exutoire Fels.

Si nous considérons que ce volume additionnel d'eau sera stocké entièrement dans le lac Bulera (200 million de m<sup>3</sup> de réserve active) et qu'on n'en perdra pas par des déversements à l'évacuateur de crues de la centrale de Ntaruka, on peut alors estimer que le volume additionnel d'eau crée par le changement d'occupation des sols des tourbières viendra augmenter de 10,6 Gwh le potentiel énergétique annuel moyen des centrales de Ntaruka, Mukungwa I et Mukungwa II.

Pour la Centrale de Rusumo/Rugezi, par contre, on ne peut compter sur la présence d'un réservoir comme celui du lac Bulera pour régulariser les débits servant à la production hydro-électrique. Pour mesurer les effets du changement d'occupation des sols des marais sur le potentiel énergétique de Rusumo/Rugezi, il faut d'abord analyser l'effet du drainage des marais sur l'hydrogramme du bassin versant.

### **8.3 Impact du drainage**

L'impact du drainage sur les tourbières sera double. D'une part, nous savons que le drainage d'une tourbière entraîne son tassement et, d'autre part, le drainage diminue le temps de réponse des bassins aux événements pluvieux ou orageux.

#### **8.3.1 Tassement des tourbières**

Le drainage d'une tourbière entraîne une perte de volume occupé par l'eau évacuée (retrait) et une décomposition de la tourbe sous des conditions aérobiques (dessiccation). Le tassement peut facilement atteindre 1 mètre d'épaisseur. Suivant le SCS (1973) le tassement initial d'une tourbière nouvellement exploitée peut atteindre 25 à 35% de la profondeur des fossés ou des drains.

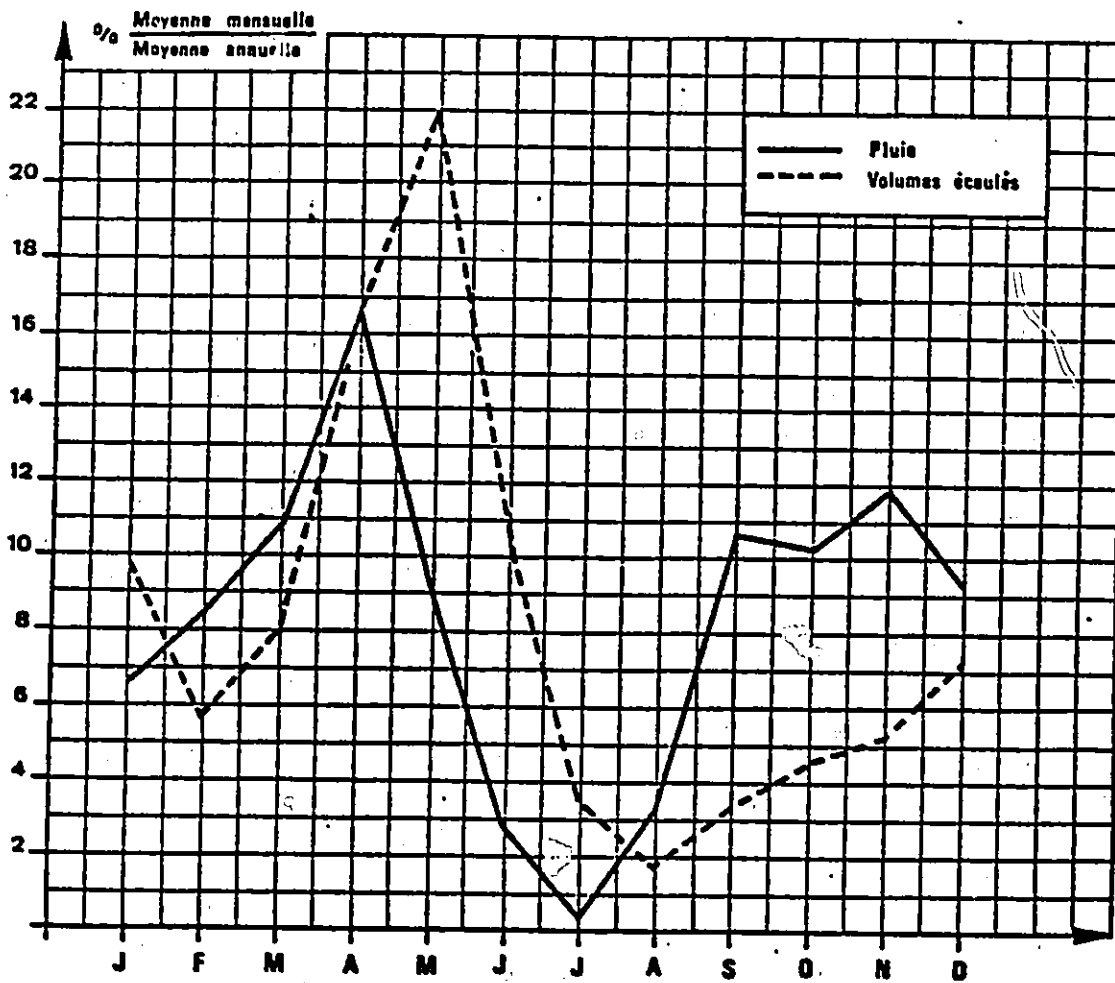
Notons aussi que le dessèchement des tourbes les rend hydrophobes, donc inutiles pour l'agriculture. Il faudra donc tenir compte de ce phénomène dans la conception du projet, ce qui nous amène à recommander un drainage par fossés de surface avec contrôle des niveaux d'eau par des seuils-déversoirs dans les fossés. Des drains perforés pourront être envisagés beaucoup plus tard lorsque le niveau de la tourbière se sera stabilisé (minimum 3 ans).

### **8.3.2 Diminution du temps de réponse du bassin**

Le drainage des marais diminuera le temps de réponse du bassin-versant aux orages et événements pluvieux. L'eau provenant du versant et des collines sera chargée de sédiments et traversera plus rapidement la tourbière, qui ne jouera plus alors son rôle de filtre. Il en résultera une charge plus grande de sédiments à la sortie du marais, à moins que des mesures d'atténuation ne soient envisagées. Le présent document ne traite pas en détail de cet aspect qui devrait plutôt faire l'objet d'une recherche détaillée lors des études d'impact environnemental.

On peut également s'attendre à ce que l'action régularisatrice des tourbières sur le régime hydrique soit modifiée. En effet, si on regarde la figure 8.4, on peut voir, dans les conditions actuelles, un décalage d'environ 1 mois entre la pluie et le ruissellement à l'exutoire. La construction de fossés de drainage viendra diminuer ce temps de réponse du bassin.

Fig. 8.4: REPARTITION MENSUELLE EN % DE  
LA PLUVIOMETRIE ET DE L'ECOULEMENT



Source: Scet/Coop 1970.

En appliquant l'équation de Manning aux fossés de drainage proposés, nous trouvons que le temps de parcours de l'eau dans le fossé le plus long (2.5 km) sera de 12 heures, si on pose que  $n = 0,027$ . En ajoutant le temps de concentration de sous-bassin 19 estimé à 28 minutes au tableau de la figure 3.5, nous aurons que le temps de réponse du bassin est égal à 12.5 heures. Sur une échelle mensuelle, on peut alors considérer que la réponse du bassin deviendra presque instantanée, alors que sans le drainage elle est actuellement d'un mois. Il s'agit là d'une modification importante dont il faut tenir compte dans la construction des hydrogrammes simulant les conditions futures de ruissellement.

Si on tient compte d'une diminution d'un mois du temps de réponse du bassin versant avec le drainage, et si on augmente le ruissellement mensuel en fonction des nouvelles valeurs de l'évapotranspiration mensuelle trouvée au chapitre 7.3, on obtient les hydrogrammes simulés représentés aux figures 8.5 a et b. L'analyse de ces figures montre que le débit mensuel moyen max. passera de  $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$  suite au développement hydro-agricole des marais. Cette hausse importante (65%) indique bien qu'en moyenne, l'effet régulateur des tourbières sera profondément modifié par le drainage. Par contre, les débits mensuels maximum passeront de  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit une hausse de 24% environ. En d'autres mots, lors de fortes crues, l'effet tampon du marais est fortement mitigé.

Pour les besoins de l'étude, on a repris à l'annexe H les hydrogrammes des débits moyens de la figure 8.5a, afin de générer des débits simulés sur la même période de temps que celle pour laquelle nous avons des données de ruissellement sur le bassin versant (1957 à 1987). Cet exercice a permis de générer les courbes de débit classés des figures 8.6 a et b, à partir desquels furent calculées la puissance et l'énergie économiquement exploitables au site de la centrale de Rugezi, avec ou sans exploitation hydro-agricole.

FIGURE 8.5a: HYDROGRAMME ANNUEL-RUGEZI  
DEBIT MOYEN

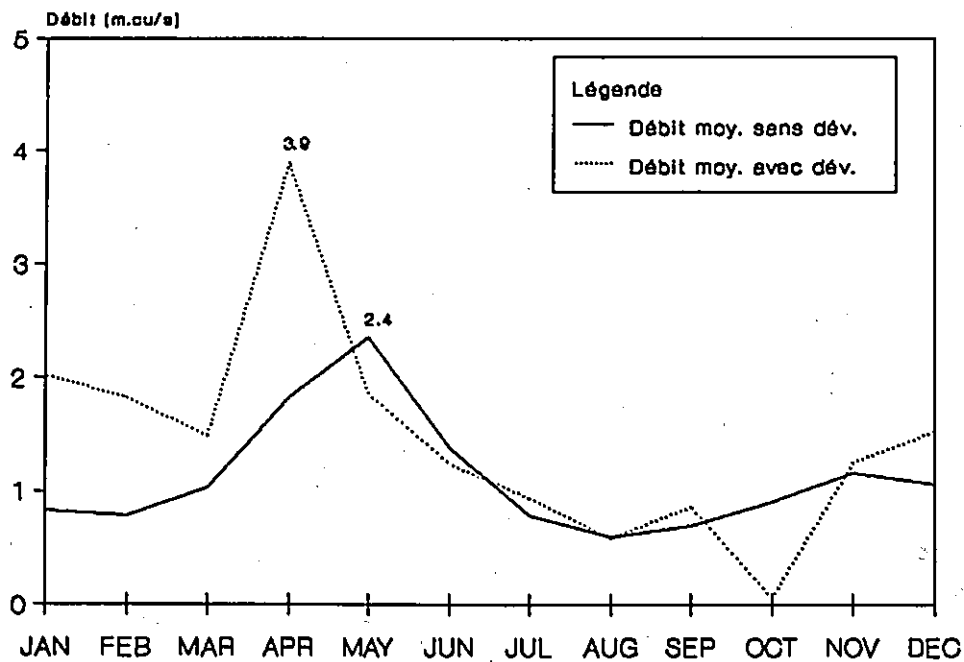


FIGURE 8.5b : HYDROGRAMME ANNUEL-RUGEZI  
DEBIT MENSUEL MAXIMUM

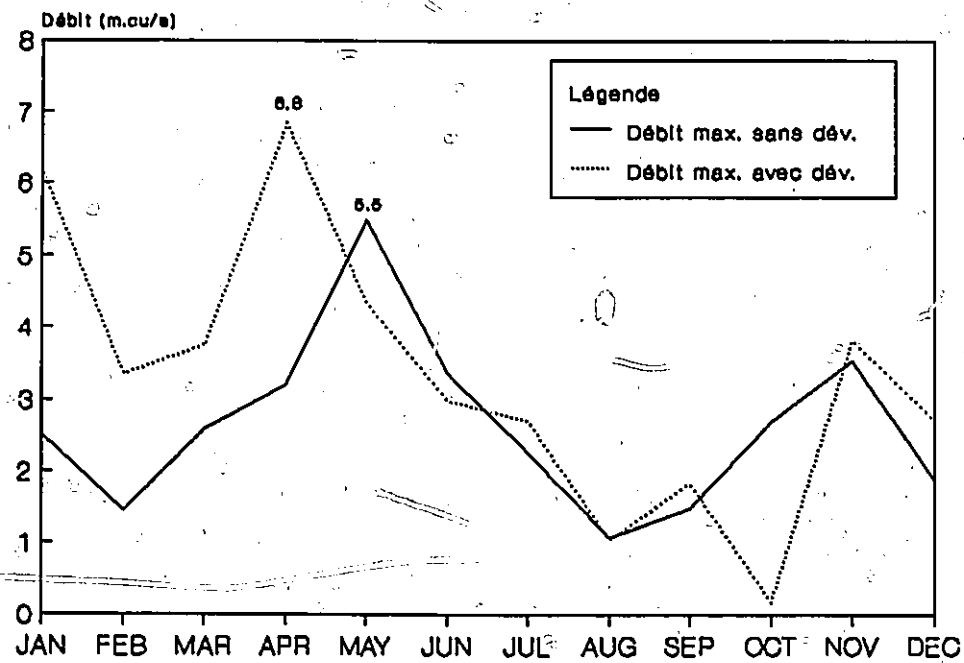


FIGURE 8.6a : Débits classés  
Sans Fels et sans aménagements hydro-agr

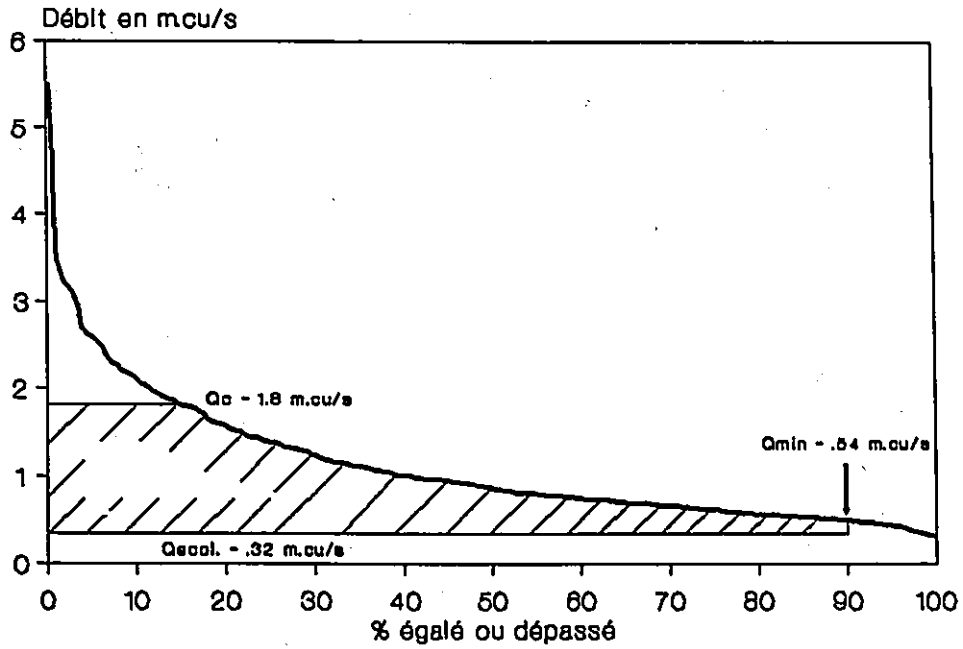
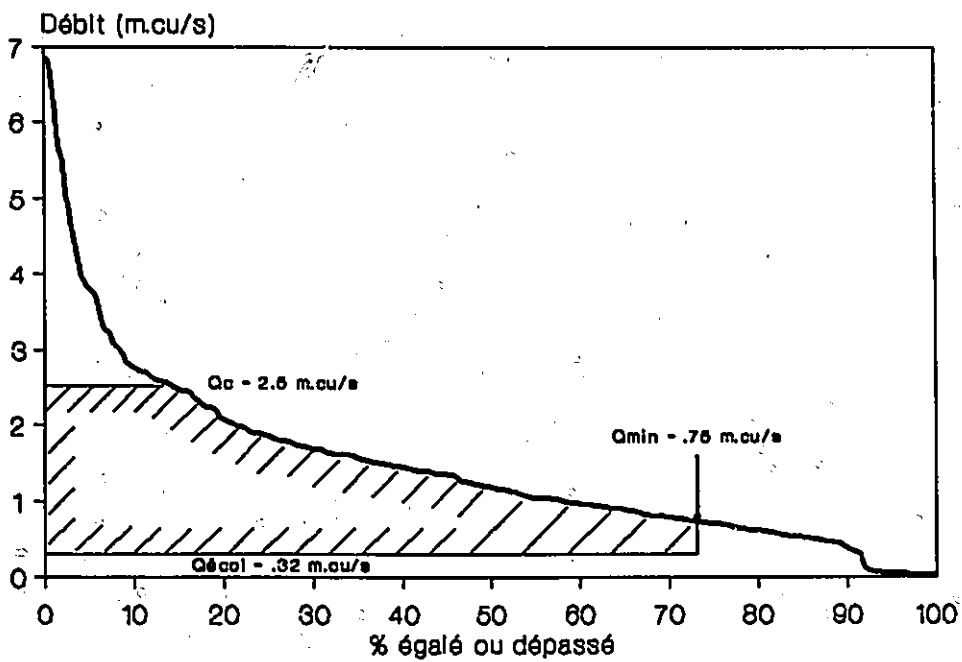


FIGURE 8.6b : Débits classés  
Avec développement hydro-agricole



On trouvera au tableau 8.4 le résultat de ces calculs. On peut y constater que l'aménagement hydro-agricole du marais réduira de 0,5 Gwh le potentiel énergétique annuel moyen de la centrale Rusumo/Rugezi. Par contre, pour l'ensemble des 4 centrales hydro-électriques du bassin de la haute-Mukungwa, le potentiel énergétique annuel moyen sera accru de 10.1 Gwh grâce au développement hydro-agricole des marais.

### 8.3.3

#### Mesures d'atténuation érosion et tassement de tourbes

Pour éviter les problèmes d'érosion et de tassement de tourbes, deux solutions s'imposent: tout d'abord la construction de barrages-tampons qui contrôleront l'eau provenant des principaux cours d'eau qui se déversent dans les marais. Cette solution déjà étudiée et proposée par la Scet (1970) permet de constituer un ensemble de petits réservoirs le long des vallées afférentes. Ces ouvrages sont conçus pour retenir les eaux d'une pluie de 78 mm en 72 heures et dont l'intervalle de récurrence est de 5 ans. L'emplacement de ces Deuxièmement, les canaux de drainage devront être équipés de seuils-déversoirs qui contrôleront le niveau de l'eau dans les tourbières. En effet, si on retourne à la figure 8.2, on constate que l'eau de gravité à écoulement lent représente 10% du volume des tourbes. Si nous posons que le drainage agira sur 50 cm d'épaisseur en moyenne (de 0,5 à 1.0 mètre de profondeur), nous aurons alors une réserve d'eau dans les tourbes de l'ordre de 3,5 millions de m<sup>3</sup>.

Finalement, soulignons l'intérêt d'installer un limnimètre à la sortie du marais Kamiranzovu afin de valider les résultats estimés dans le présent document. Ce marais déjà aménagé permettra d'établir avec plus de précision l'hydrogramme du bassin Rugezi.

TABLEAU 8.4: IMPACT DE L'EXPLOITATION AGRICOLE SUR LE  
POTENTIEL HYDRO-ELECTRIQUE DE LA MUKUNGWA

CENTRALE	HAUTEUR DE CHUTE m.	EFFICACITE TURBINE	SANS EXPLOITATION		AVEC EXPLOITATION		DIFFERENCE GWh	PRODUCTION NOMINALE GWh	ACCROISSEMENT RELATIF. %	
			Vol.effectif Million m	GWh	Vol.effectif Million m	GWh				
RUGEZI	161	0.84	34.7	12.8	33.4	12.3	-0.5	13	-4	
NTARUKA	101	0.84	43.5	10.1	63.1	14.6	4.5	22	21	
MUKUNGWA 1	110	0.84	43.3	10.9	62.6	15.8	4.9	45	11	
MUKUNGWA 2	28	0.84	43.3	2.8	62.6	4.0	1.2	16	8	
TOTAL :								10.1	96	11

Note: -Les surplus d'eau attribuables à la baisse d'évapotranspiration se traduiront par des pointes de débits qui seront déversés au trop-plein de Rugezi.

TABLEAU 8.5 : BENEFICES IMPUTABLES  
AU DEV. HYDRO-AGRICOLE

CENTRALE	SURPLUS D'ELECTRICITE ATTRIBUABLE A L'EXPLOITATION AGRICOLE (GWh)													
	ANNEE	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
NTARUKA				4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
MUKUNGWA I				4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
MUKUNGWA II				1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
RUSUMU/RUGEZI											-0.5	-0.5	-0.5	
TOTAL		0	0	0	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.1	10.1	10.1
PRIX UNITAIRE f/kwh		10	10	11	11	12	12	12	13	13	14	14	15	16
BENEFICE millions frw		0	0	0	117	128	128	128	138	138	149	142	152	162

Note: -un taux d'augmentation de 3% par année a été appliqué au prix de vente d'électricité.  
-nous supposons que le projet de développement hydro-agricole ne serait pas opérationnel avant 1991.

## 9.0 CONCLUSIONS

En guise de conclusion, plusieurs éléments ressortent du présent document:

- Le développement du Rwanda passe par le développement agricole et l'assainissement des marais, de même que par l'exploitation optimale de ses ressources hydro-électriques (Section 2.4.2 et 2.5.4).
- Le bassin versant de la Haute-Mukungwa se situe dans une zone où les précipitations de type convectif sont influencées par des phénomènes orographiques (volcans, Kabuye). La présence des lacs et du marais peuvent également influencer sur le micro-climat de la région (Section 4.2.4 et Figure 4.4).
- Les pertes en eau par infiltration profonde sont négligeables dans le sous-bassin Rugezi (Figure 7.1).
- Il n'y a pas de migration importante des eaux souterraines entre les lacs Bulera et Ruhondo (Section 5.1).
- L'évapotranspiration joue un rôle primordial dans le bilan hydrique de la rivière Mukungwa. Pour le sous-bassin Rugezi, 80% des précipitations annuelles retournent à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (Section 7.0).
- A partir d'un bilan hydrique annuel, il a été possible d'établir qu'un coefficient cultural  $K_c = 1,0$  est applicable aux tourbières non cultivées de la région (Section 7.1.3).
- Le sous-bassin Rugezi, avant la fermeture de Fels, contribuait pour 30% du volume d'eau sortant du lac Bulera et 14% de celui sortant du lac Ruhondo.
- Après la fermeture de Fels, ces valeurs augmentent de 25%. Le potentiel hydro-électrique attribuable à la fermeture sera accru de 7.5 GWh (Tableau 8.1).

- L'utilisation hydro-agricole des marais modifiera de façon positive le volume d'eau disponible pour la production hydro-électrique de l'ensemble du bassin de la Haute-Mukungwa. Le volume additionnel sera égal à 17.7 million de m<sup>3</sup> d'eau en moyenne par année (Section 8.3.2).
- Le développement hydro-agricole contrôlé des marais augmentera le potentiel hydro-électrique de 10.1 Gwh (Tableau 8.4).
- Le temps de réponse du bassin Rugezi passera de un mois à moins d'une journée, augmentant du même coup les pointes mensuelles de débit de 65% (figures 8.5 a et b).
- C'est la centrale de Rugezi qui sera la plus influencée par l'utilisation hydro-agricole des marais avec une diminution de son potentiel énergétique moyen de 0,5 Gwh (Section 8.3.2.).
- La construction de barrages-tampons s'avère essentielle pour le développement hydro-agricole des marais et la protection du potentiel hydro-électrique de la centrale Rugezi (Section 8.3.2).

Ainsi, si nous reprenons les premières questions que nous nous sommes posées au tout début, à la page 6, soit:

**a) Quelle est l'influence des marais sur le régime hydrologique alimentant les centrales existantes de Ntaruka, et Mukungwa I, et les futures centrales de Rugezi et Mukungwa II?**

On peut répondre que ces marais sont en fait des tourbières qui, par leur perméabilité ( $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  cm/sec) et leur pouvoir de rétention d'eau (40 à 65%), jouent un rôle de régularisateur des débits d'eau sortant du sous-bassin Rugezi. Par contre, cet effet régularisateur ne se fait pas sentir plus à l'aval à cause des volumes importants d'eau emmagasinée dans le lac Bulera (200 millions de m.cu de réserve active comparativement à un volume de ruissellement annuel de 43.6 millions de m.cu pour le sous-bassin Rugezi).

D'autre part, le fait que la végétation des marais bénéficie d'un apport constant en eau crée un phénomène d'évapotranspiration réelle pratiquement égal à l'évapotranspiration potentielle, retournant ainsi des quantités importantes d'eau à l'atmosphère (1453 mm/an) comparativement à 801 mm/an sur les versants cultivés des marais.

**b) Dans quelle mesure l'aménagement hydro-agricole des marais modifiera-t-il ce régime hydrologique?**

En tenant compte de la fermeture de l'exutoire Fels, l'aménagement hydro-agricole des marais réduira les pertes par évapotranspiration, qui passeront de 980 mm/an à 889 mm/an. Ceci se traduira par une augmentation correspondante du ruissellement à la sortie du marais Rugezi, passant de 43,7 millions de m.cu par an à 63,3 millions de m.cu par an, soit une augmentation de près de 45% du volume annuel moyen de ruissellement.

**c) Dans le cas d'un impact négatif de ces aménagements sur le potentiel hydro-électrique du bassin de la Mukungwa, quelles sont les mesures de mitigation à envisager?**

L'impact négatif majeur réside dans l'augmentation du ruissellement qui provoquera de l'érosion et du transport de sédiments. Pour mitiger ces effets, nous proposons de retenir la solution de la Scet (1970) et de construire des barrages-tampons pour retenir les eaux se déversant dans les marais. Nous proposons également de contrôler le niveau d'eau dans les tourbières grâce à des seuils-déversoirs le long des canaux de drainage; le niveau devra être maintenu entre 0,5 et 1.0 m de profondeur sous les surfaces en culture.

Un second impact dû au drainage sera le tassement de la tourbe. Ce tassement pourra facilement atteindre 30 cm. Il importe donc de concevoir un drainage de surface uniquement et de prévoir un entretien régulier des fossés. Les seuils-déversoirs devront être ajustables.

Notons aussi que les tourbières mises en culture sont fortement sujettes à l'érosion éolienne. Cette érosion peut être réduite d'une part en maintenant le niveau d'eau assez élevé dans le sol et, d'autre part, en construisant des brise-vent.

## **10.0 RECOMMANDATIONS**

Toute une série de recommandations découlent de l'étude. Elles sont énumérées ici en vue de guider les décideurs rwandais dans le développement du potentiel agricole et énergétique du bassin de la haute Mukungwa.

### **Réseau pluviométrique**

- Equilibrer le réseau pluviométrique en fonction des altitudes, avec l'ajout de stations pluviométriques entre 2500 et 3000 mètres d'altitude (par exemple dans le parc des volcans et dans la région de Mukamira).
- Pour les besoins hydrologiques, installer un pluviomètre près du limnimètre de Rugezi dans la commune de Butaro.
- Installer un pluviomètre à Kirambo.
- Relocaliser le bac d'évaporation classe A de Ruhengeri du côté Sud-Est des lacs (par exemple à la sous-préfecture de Kirambo).

### **Réseau hydrométrique**

- Du point de vue institutionnel, il faudrait renforcer le service d'hydrologie du Minagri. Un programme d'assistance technique pourrait être préparé et soumis à des bailleurs de fonds (ex. PNUD) afin de mettre à jour les données, les vérifier et introduire des méthodes de contrôle informatisées.
- Vérifier et changer au besoin les courbes de tarage des stations de Rugezi et Rwaza.
- Compiler dans les annuaires hydrologiques les débits turbinés aux centrales de Ntaruka et de Mukungwa I.
- Mesurer les débits à la source de la rivière Kabaya (limite des communes de Butaro et Kidako).
- Installer un limnimètre sur la rivière Cyeru (à Kirambo).

- Installer une station limnimétrique au site de Mukungwa II.
- Installer un limnimètre à la sortie du marais Kamiranzovu.

#### Mise en valeur des tourbières

- Pour le développement hydro-agricole des tourbières de Rugezi, nous recommandons un réseau de drainage tel que proposé à la variante B de la Scet en 1970, sauf qu'un seul exutoire est retenu, celui de Rugezi. On retrouvera à l'annexe G les détails des installations proposées, mais notons ici les éléments importants à respecter:
  - . la variante B prévoit la réalisation de retenues de régularisation là où les thalwegs des bassins versants débouchent dans les marais (barrages-tampons).
  - . tous les canaux et drains seront en surface (aucun drain souterrain avant stabilisation des tassements, c'est-à-dire pas avant trois ans).
  - . les profondeurs moyennes choisies pour les divers réseaux sont:

: canaux collecteurs	- 1,20 m
: canaux principaux	- 1,20 m
: canaux secondaires	- 1,00 m
: canaux de parcelle (tertiaires)	- 0,80 m
- Pour contrôler le niveau de l'eau dans la tourbière, les canaux secondaires seront pourvus de chutes ou seuils-déversoirs dont la hauteur se situera entre 0,5 et 1.0 mètre. Durant la saison sèche, ces chutes joueront le rôle de régularisation du plan d'eau. Dans ce but, elles seront pourvues de rainures ou de vannettes en bois servant à hausser ou abaisser le niveau de l'eau dans le canal. L'espacement entre les chutes le long des canaux secondaires ne devra pas dépasser 100 mètres.
- L'espacement entre l'axe des canaux sera de:
  - . 400 mètres pour les canaux principaux;
  - . 83 mètres pour les canaux secondaires;
  - . 28 mètres pour les canaux tertiaires.

- Avec la fermeture Fels, la zone IV du marais (Hondo) sera laissée non-aménagée et servira à régulariser les débits traversant le marais. La superficie due aux emprises des ouvrages totalisera 1038 hectares pour les zones II et III de la figure 8.1.

#### Développement hydro-électrique

- Le développement hydro-électrique du site du Rugezi/Rusumo doit se faire conjointement avec le développement hydro-agricole des marais.
- La centrale de Rugezi aura une puissance installée de 3,3 Mw et devra être équipée d'un nombre suffisant de turbines pour pouvoir faire face aux pointes de débit en saison des pluies. Pour préciser les pointes de débit, il sera nécessaire de prendre des mesures en continu à la sortie du marais déjà aménagé de Kamiranzovu et de transposer les résultats à l'ensemble des marais. Cette étude s'impose avant de procéder à la conception détaillée des installations.
- Les centrales de Rugezi et de Ntaruka devront être exploitées conjointement et de façon telle qu'en période de production excédentaire, la centrale de Ntakura ralentisse sa production afin de reconstituer sa réserve du lac Bulera.

#### Impact environnemental

- Une étude d'impact environnemental devra être envisagée avant d'exploiter le potentiel énergétique et agricole des marais. Cette étude devra tenir compte, entre autres, de l'érosion à l'aval et dans les marais, du changement dans la qualité de l'eau (pH, sédiments), et des risques de bilharziose que le projet peut entraîner au lac Bulera. La dessication des tourbes, l'érosion éolienne et les modifications du micro-climat devront également être pris en compte.

#### Développement des institutions

- Comme le projet touche à la fois l'énergie et l'agriculture, le développement des marais devrait être confié à une société de gestion représentant les intérêts du Minagri, du Minitrape et du Ministère de l'Intérieur. Cette société aurait pour mandat spécifique le développement et l'exploitation du potentiel énergétique et agricole du sous-bassin Rugezi.

**REFERENCES**

## REFERENCES

Alford, D., "Mountain hydrologic systems" Mountain Research development Vol. 5 No. 4, 1985, pp 349-363.

Antun, p., Gerards, J., Petricec, V., "Carte géologique du Rwanda: Ruhengeri Nord", Service de Géologie du Rwanda, 1971.

Banque Mondiale "Rapport sur le développement dans le Monde 1987", Washington, 1987.

Battistini, R., Prioul, C., "Problèmes Morphologiques du Rwanda", Ceget, No. 42 Bordeaux, Mai 1981, pp 44-76.

Blaney, H.F. et Ewing, P.A., 1946. "Irrigation Practices and consumptive use of water in Salinas Valley, Cal". U.S. dept. of Agriculture. L.A. Ca. 93pp.

Budyko, M.I., et al. "World Water Balance and Water Resources of the Earth", UNESCO, Paris, 1978.

Bugiruwenda, J.B., Jost, C., "La Morphydynamique naturelle et anthropique dans le bassin versant de la Cyeru", Université Nationale du Rwanda, Département de Géographie, Ruhengeri, 1987.

BUNEP "Etude du Secteur énergétique au Rwanda", BUNEP/EPFL, Rwanda, 1983.

Chow, V.T. et al., "Handbook of Applied Hydrology" McGraw-Hill, NY, 1964.

Creager, W.P., Justin, J.D., "Hydroelectric handbook", John Wiley and Sons Inc., NY, 1950.

Daugherty, R.L., Franzini, J.B., "Fluid mechanics with Engineering applications", McGraw-Hill, NY, 1977.

Deuse, Paul "Contribution à l'étude des tourbières du Rwanda et du Burundi" Institut National de recherche scientifique, Butare, Rwanda, Publication No. 4, 1966.

Dolan, T.J., Hermann, A.J., Bayley, S.E., "Evapotranspiration of a Florida, U.S.A. Freshwater Wetland", J. Hydrology, 74, pp 355-371, 1984.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O., "Les besoins en eau des cultures", Bulletin d'irrigation et de drainage No. 24, F.A.O., Rome, 1975.

Dos Ghali, J. et al., "L'Energie dans les pays en voie de développement. Un Cas: Le Rwanda", Polyrama No. 64, Octobre 1984, pp 2 - 17.

EPRI, "Simplified Methodology for Economic Screening of Potential Small Capacity Hydro-Electric sites". Palo Alto, Ca. 1981.

FAO "Annuaire de la production 1985", Rome, 1986.

Freeze, A.R., Cherry, J.A., "Groundwater", Prentice Hall, New Jersey, 1979.

Gatashya, J.B., "L'homme et l'eau en région volcanique. Approvisionnement en eau et bilharziose sur la planèze orientale du Muhabura" UNR, Ruhengeri, Rwanda, 1983.

Gatete, A., Wassmer, P., "Etude Morphydynamique de la rivière Mukungwa", UNR, Ruhengeri, Rwanda, 1986.

Gel'bukh, T.M., 1964. "Evapotranspiration from overgrowing reservoirs" Publ. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 62: 87.

Gotanegre, J.F., Prioul, C., Sirven, P., "Géographie du Rwanda", Ed. de Boeck, Kigali, 1975.

Gray, D.M. et al., "Manuel des Principes d'hydrologie", CNRC, Ottawa, 1972.

Greenwood, E.A.N., Klein et al., "Differences in annual evaporation between grazed pasture and eucalyptus species in plantation of saline farm catchment", Journal of hydrology (1985) Vol. 78, pp 261-278.

Griffiths, J.F., "Climates of Africa : World Survey of Climatology", Elsevier Publishing Company, NY, 1972.

Haan, C.T., "Statistical Methods in Hydrology", Iowa State University, Press/Ames, 1977.

Habimana, S., "Les tourbières du bassin versant des lacs Bulera et Ruhondo "Kiguhur et Rugezi - Kamiranzovu). UNR, Butare, 1978.

Hathaway, G.A., "Design of drainage facilities" Trans. ASCE Vol. 110, 1945.

Henning, I., Henning, D., "Potentiel Evapotranspiration in mountain geocosystems of different altitudes and latitudes", Mountain Research and Development, Vol. 1, No. 3-4, 1981, pp 267-274.

Hjelmfelt, A. Jr., Cassidy, J.L., "Hydrology for Engineers and Planners", Iowa State University, Press/Ames, Iowa, 1975.

Horton, R.E., "Drainage basin characteristics", Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 13, pp 350-361, 1932.

Jacquet, J., "Comparaison de procédés de mesure directe de l'évaporation et de l'évapotranspiration sur des bassins versants expérimentaux", Assemblée Générale de Berkeley: comité de l'évaporation, I.A.S.H. Gentbrugge, Belgique, 1963.

Jaton, J.R., "Etude de quelques propriétés des sols tourbeux et leur influence sur le drainage", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1977.

Katabarwa, J.B., "La chaîne des Birunga. Etat des Connaissances actuelles", Paris, 1980.

Kohler, M.A. et Parmele, L.H., 1967, "Generalised estimates of free-water evaporation". Water Resources Res., 3(4): pp. 966-1005.

Kohler, M.A., Nordenson, T.J., Fox, W.E., "Evaporation from pans and lakes", U.S. Weather Bur. Res. Pap. 38, 1955.

Lantagne, M., "Irrigation/Drainage: Notes de cours", Faculté d'agronomie - Université Nationale du Rwanda, Butare, 1987.

Linacre, E.T., Hicks, B.B., Sainty, et Grauze, G. "The evaporation from a swamp" Agr. Meteorol., 7 (1970) pp. 375-386.

Linsley, R.K., Kohler, M.A. Paulhus, J.L.J., "Hydrology for Engineers", McGraw-Hill, NY, 1982.

Linsley, R.K., Franzini, J.B., "Water Resources Engineering", McGraw-Hill, NY, 1979.

Lockwood, J.G., "Causes of Climate", Edward Arnold, London, 1979.

Lombardi Engineering, "Etude de factibilité et d'avant-projet détaillé pour l'augmentation de l'apport hydrique du lac Bulera. Phase I, rapport Technique provisoire, deuxième édition" Minitrape, Rwanda, 1987.

Merva, G., Fernandez, A., "Simplified Application of Penman's equation", ASAE Paper No. 82-2013, 1982.

Ministère des Relations Intergouvernementales du Québec, "le Rwanda; Profil agro-alimentaire", Québec, 1987.

Morton, F.I., "Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology", Journal of hydrology, 66 (1983), pp 1-76.

Motor-Columbus et Oskar Von Miller, S.A.R.L., "Etude de l'aménagement hydro-électrique de Mukungwa II; Avant-projet", Minitrape, Rwanda, 1987.

Mushenguzi, P.C., "Hydro-Climatologie dans la région des Laves au Nord du Lac Ruhondo", UNR, Ruhengeri, 1984.

Nagler, F.A., Davis, A., "Experiments on Discharge over Spillways and Model, Koekuk Dam", Trans. A.S.C.E., 1930.

Nemec, J., "Engineering Hydrology", McGraw-Hill, New Delhi, 1973.

OMM "Guide to hydrological Practices" World Meteorological Organization No. 168, Geneva, Switzerland, 1974.

Pair, C.H. et al., "Sprinkler Irrigation", Sprinkler Irrigation Association, U.S.A., 4<sup>ème</sup> édition, 1975.

Penman, H.L., 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A, 193: 120-145

Rijks, D.A., 1969 "Evaporation from a papyrus Swamp". Quart J. Roy. Meteorol. Soc., 95, pp. 643-649

Penman, H.L., 1963. "Vegetation and hydrology". Commonwealth Bur. Soil. Sci. (Gt. Brit.) Tech. Commun., 53: 64-65.

Romanov, V.V., "Evaporation from bogs in the European territory of the USSR", Israel program for scientific translations, Jerusalem, 1963.

Roose, E., Lelong, F., Colombani, J., "Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'Ouest", Journal des sciences hydrologiques, 28, 2, 6/1983, pp 283-309.

Rouse, H., Reid, L., "Model research on Spillway crests", Civil Eng., Janvier 1935.

SCET/COOP "Marais Rugezi et Kamiranzovu: Avant-projet de Mise en Valeur Agricole", Minagri, Rwanda, 1970.

SCS "Drainage of agricultural land", Water Information Center Inc., Syosset, New York, 1973.

Sharma, T.C., "An Evaluation of Evapotranspiration in Tropical Central Africa", Journal of Hydrology 33, 1, 2/1988, pp 31-40.

Starosolszky, O., "Applied Surface Hydrology", Water resources publications, Littleton, Colorado, pp 650-651, 1987.

Stuart, W.T., Brown, E.A., Rhodehamel, E.C., "Groundwater investigations of the Marquette iron mining district", Michigan, Geol. Surv. Div. Tech. Rept. No. 3, 1954.

U.S.B.R. "Groundwater Manual : A Water Resources Technical Publication", U.S. Bureau of Reclamation, Washington, 1979.

WASH "Ruhengeri Water Resource Study, Rwanda", Wash field report No. 181, Arlington, Virginia, 1986.

Weber, W., Nyamulinda, V., "Profil de l'Environnement de la Préfecture de Ruhengeri, Rwanda", RRAM-ETMA/USAID, Rwanda, 1987.

Wiesner, J.C., "Hydrometeorology", Chapman and Hall Ltd., London, 1970.

**ANNEXE A**

**DONNEES BRUTES DE PRECIPITATION**

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATIONRUHUNDE  
 ALT. 2275 m.

LAT.SUD : 1 33'  
 LONG.EST:29 56'

SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1954	26.2	172.1	88.8	193.0	157.0	60.9	22.8	77.5	86.9	47.4	47.5	98.7	1078.8
1955	60.5	137.9	170.9	201.7	44.8	10.4	50.4	38.3	260.5	134.7	85.2	149.1	1344.4
1956	83.1	88.2	149.3	297.0	86.7	6.0	0.0	84.2	84.9	132.8	85.7	92.8	1190.7
1957	106.9	114.8	114.3	300.2	223.6	45.6	14.5	65.6	24.7	167.6	91.7	181.5	1451.0
1958	194.3	237.3	138.9	237.2	211.5	9.4	5.7	21.3	39.8	99.5	126.5	149.3	1471.3
1959	75.8	109.1	107.8	210.0	150.8	0.0	0.0	10.9	146.6	138.4	175.2	89.3	1213.9
1960	93.9	84.3	67.7	199.0	30.0	7.7	0.5	45.8	124.5	85.4	45.1	12.9	796.8
1961	38.6	62.9	173.0	143.6	62.4	0.0	0.0	10.8	75.6	95.4	192.0	108.0	962.3
1962	120.4	36.4	81.4	136.8	150.8	53.8	0.0	74.2	121.4	141.4	130.8	56.4	1103.8
1963	92.4	54.6	137.6	299.0	217.0	11.6	0.0	40.2	173.2	50.4	156.0	200.2	1432.2
1964	103.2	117.6	89.0	308.8	71.0	20.0	18.6	0.0	95.6	237.4	108.6	228.2	1398.0
1965	105.2	18.4	279.4	388.6	110.8	0.0	0.0	29.2	104.8	154.4	115.8	138.8	1445.4
1966	79.4	134.5	120.1	315.3	96.4	22.0	3.2	151.2	132.8	151.2	228.1	33.4	1467.6
1967	58.4	139.6	167.8	296.2	197.0	109.8	2.4	23.2	224.4	116.0	351.4	146.6	1832.8
1968	77.4	292.0	154.0	290.4	247.0	109.0	24.2	13.0	68.4	150.0	224.0	84.2	1733.6
1969	185.0	261.2	106.2	168.0	357.6	9.6	0.0	2.2	102.8	64.2	108.0	39.8	1404.6
1970	65.7	101.8	232.0	213.2	119.2	12.0	71.2	49.0	68.0	114.6	109.8	98.4	1254.9
1971	129.4	96.0	66.8	264.0	208.2	23.2	41.4	39.6	99.4	126.2	85.6	122.2	1302.0
1972	81.0	208.0	190.2	216.2	140.8	151.0	0.0	47.6	118.0	105.0	146.6	45.8	1450.2
1973	54.4	139.0	128.2	280.0	183.2	4.0	0.0	44.0	251.6	76.6	186.8	76.2	1424.0
1974	40.2	57.8	127.0	179.6	143.6	175.8	94.2	21.0	140.4	85.2	132.0	99.7	1296.5
1975													
1976	13.7	121.3	84.0	175.1	180.2	6.3	12.0	97.5	61.5	79.3	155.5	67.5	1053.9
1977	221.9	76.3	137.6	236.8	69.8	51.1	17.5	42.3	45.9	157.9	257.8	84.2	1401.1
1978	111.2	91.8	266.4	152.2	121.9	38.8	16.6	39.9	97.0	117.8	139.6	69.2	1262.4
1979	189.5	103.7	101.2	194.7	195.9	74.7	11.7	58.6	77.8	69.7	111.0	98.2	1286.7
1980	69.5	60.8	162.1	196.9	176.1	12.0	0.0	60.6	97.3	91.7	210.4	120.3	1257.7
1981	52.2	46.4	228.2	230.2	175.1	7.1	27.5	122.0	57.5	117.2	123.5	89.7	1276.6
1982	33.9	74.6	148.7	221.8	181.0	56.2	5.5	26.0	194.8	118.7	208.6	126.3	1396.1
1983	0.0	78.9	140.4	216.4	38.2	29.8	34.0	98.5	120.6	222.0	243.9	75.7	1298.4
1984	106.4	49.3	160.5	178.0	37.5	0.0	86.3	53.5	66.8		122.3	83.5	
1985	43.2	51.6	176.5	262.9	70.9	22.4	18.8	3.9	177.9	149.2	146.4	46.1	1169.8
1986	67.1	122.1	100.5	295.6	126.5	42.9	0.0	0.3	82.1	91.3	108.9	113.1	1150.4
NOY.	67.0	110.6	143.6	234.3	143.2	37.0	18.1	46.6	113.2	119.0	148.8	100.8	1309.9
NBRE.	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	32.0	32.0	31.0
STD.	52.0	63.6	52.5	58.7	71.8	43.7	25.0	35.5	57.6	43.1	64.5	47.1	200.6
MIN.	0.0	18.4	66.8	136.8	30.0	0.0	0.0	0.0	24.7	47.4	45.1	12.9	796.8
MAX.	223.9	292.0	279.4	388.6	357.6	175.8	94.2	151.2	260.5	237.4	351.4	228.2	1832.8

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES

1302.2

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION : RWERERE COLLINE    LONG.EST: 29 52'  
 ALT. 2350 m.                    LAT.SUD : 1 30'                    SOURCE:I.S.A.R.

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1961	55.4	105.5	106.5	85.3	126.0	5.0	1.9	22.6	115.5	132.0	176.7	175.6	1112.0
1962	109.4	53.7	77.2	117.5	116.0	36.7	0.3	84.7	139.5	192.9	161.2	101.9	1191.0
1963	143.7	97.2	148.1	365.3	220.7	31.2	16.0	29.4	126.4	15.9	178.1	166.8	1538.8
1964	45.0	142.9	108.5	240.3	39.3	17.5	38.5	11.5	75.5	160.7	90.9	167.5	1138.1
1965	71.2	73.2	292.2	151.1	99.4	2.2	0.0	56.6	114.5	131.5	133.8	120.7	1246.4
1966	53.9	168.1	135.7	214.9	47.0	34.3	6.3	83.7	121.6	52.6	126.4	48.5	1093.0
1967	30.9	53.3	157.4	195.6	209.6	67.0	4.1	8.3	165.7	100.3	175.9	90.1	1258.2
1968													
1969	135.3	211.7	113.5	108.8	123.9	4.1	0.0	30.1	90.2	97.7	118.3	34.8	1068.4
1970	114.2	92.0	172.1	242.0	106.2	3.4	49.9	62.4	79.9	91.7	89.4	67.5	1170.7
1971	94.2	89.5	102.0	232.4	166.7	12.5	65.5	28.4	121.9	193.8	141.5	59.2	1307.6
1972	84.4	133.1	145.6	171.9	154.5	120.0	0.0	56.4	132.0	158.0	161.3	40.1	1357.3
1973	34.8	99.6	97.2	185.0	141.7	10.7	0.0	63.8	159.0	96.3	177.8	90.7	1156.6
1974	50.1	118.0	203.4	191.3	205.2	89.3	128.4	30.8	98.5	80.0	83.8	92.0	1370.8
1975	111.8	55.3	146.1	273.2	135.7	9.1	58.1	20.2	246.8	198.4	46.7	119.8	1421.2
1976	27.2	112.7	114.3	151.0	140.6	17.4	44.7	105.1	139.8	93.5	150.2	66.7	1163.2
1977	197.0	67.1	130.7	196.6	65.6	75.9	12.4	115.5	47.2	120.0	281.4	100.1	1409.5
1978	82.0	143.0	189.3	132.8	106.6	40.1	0.0	38.8	86.7	158.9	120.0	123.2	1221.4
1979	119.7	121.5	111.2	158.8	139.0	67.0	45.0	66.6	25.8	76.3	80.9	107.3	1119.1
1980	43.7	54.9	96.3	222.0	172.4	14.9	4.5	73.7	96.1	96.0	191.1	104.3	1169.9
1981	44.6	27.1	126.0	242.4	140.1	25.2	34.6	138.2	116.4	133.8	100.8	65.1	1194.3
1982	40.0	104.2	101.8	231.7	210.2	47.7	3.2	9.9	220.8	101.2	180.2	101.4	1352.3
1983	4.3	81.1	184.1	230.1	32.7	21.6	24.3	65.2	106.6	219.6	177.4	64.5	1211.5
1984	42.1	96.5	137.1	123.0	20.0	0.8	36.3	73.3	60.5	163.7	96.2	87.4	936.9
1985	45.5	54.3	182.1	206.5	46.5	24.6	29.7	14.5	107.6	118.6	178.4	36.3	1044.6
1986	83.8	125.3	105.4	209.1	88.2	26.7	0.0	12.3	52.8	138.1	97.4	100.9	1040.0
1987	119.9	117.6	175.6	124.8	127.5	32.1	0.0	34.3	194.6	96.7			
NOY.	76.3	99.9	140.7	192.4	122.4	32.2	23.2	61.4	117.0	123.8	140.6	93.5	1211.7
nbre.	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	25.0	25.0	25.0
std.	43.9	40.2	44.9	59.5	55.9	29.2	29.5	34.3	50.1	46.9	49.1	38.5	137.1
MIN.	4.3	27.1	77.2	85.3	20.0	0.8	0.0	8.3	25.8	15.9	46.7	34.8	936.9
MAX.	197.0	211.7	292.2	365.3	220.7	120.0	128.4	138.2	246.8	219.6	281.4	179.6	1538.8

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES                    1213.5

-----

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION: RWEREZE MARAIS  
 ALT. : 2114 m.

LONG. EST: 29 53'  
 LAT. SUD : 1 29'

SOURCE: I.S.A.R.

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1959	128.4	48.5	96.0	187.9	106.1	1.4	0.5	39.1	125.6	134.4	117.1	91.9	1076.9
1960	86.3	60.8	94.1	221.1	29.8	6.1	5.0	24.0	124.0	112.4	63.2	50.8	877.6
1961	52.6	108.8	90.7	64.8	101.8	5.1	1.6	38.1	124.7	115.5	141.7	187.0	1032.4
1962	110.0	84.7	57.8	141.8	101.2	41.6	2.0	60.4	170.4	222.6	157.5	127.2	1277.2
1963	149.6	83.7	112.5	309.9	205.2	32.8	1.4	22.5	113.6	23.8	162.3	150.8	1368.1
1964	44.6	142.7	125.9	220.7	37.4	9.8	31.2	10.2	64.1	158.7	73.4	172.2	1090.9
1965	68.6	72.9	225.9	157.6	98.8	6.5	0.0	48.0	89.6	134.8	83.5	115.3	1101.5
1966	44.4	131.0	134.0	199.7	43.6	18.1	0.7	80.7	128.9	43.1	153.8	32.6	1010.6
1967	29.4	44.1	121.1	172.1	164.4	71.7	3.1	6.6	172.8	76.3	155.1	94.0	1110.7
1968	33.5	156.5	139.2	166.6	116.5	83.3	16.6	24.6	52.0	109.4	186.6	56.6	1141.4
1969	115.4	170.8	151.2	101.6	125.9	4.5	0.0	14.9	56.6	79.7	115.6	31.6	967.8
1970	108.5	85.4	164.8	232.7	102.8	6.2	46.6	51.4	82.6	98.9	67.5	63.4	1110.8
1971													
1972	84.6	125.3	151.7	162.5	158.5	184.7	0.0	52.9	139.4	167.5	124.8	40.8	1392.7
1973	53.5	84.1	106.3	208.6	138.3	15.9	0.0	68.9	165.1	76.7	143.3	68.5	1129.2
1974	49.9	109.5	231.4	261.9	194.2	70.9	137.3	22.1	94.9	74.1	86.5	71.2	1403.9
1975	111.4	48.4	181.4	262.1	134.5	9.2	89.2	29.3	291.3	181.6	41.8	116.1	1496.3
1976	24.5	95.3	118.6	164.2	139.1	14.0	28.6	116.4	138.2	75.8	132.9	48.7	1096.3
1977	157.7	76.7	128.5	184.0	52.2	84.5	9.7	98.0	54.1	100.5	237.5	82.2	1265.6
1978	85.4	142.9	194.4	104.6	104.7	45.3	0.2	40.7	102.7	130.1	89.3	109.0	1149.3
1979	93.2	141.3	133.5	167.4	149.5	55.2	46.9	65.3	21.4	74.7	89.1	112.1	1149.6
1980	45.5	60.3	113.5	212.1	173.9	20.1	2.2	85.4	43.0	108.4	187.9	90.9	1143.2
1981	41.1	26.6	121.9	216.9	109.2	16.1	36.6	135.4	58.1	137.7	58.2	55.3	1013.1
1982	38.4	67.7	108.9	219.6	172.1	50.6	1.2	9.9	214.8	100.7	213.2	68.9	1266.0
1983	3.3	45.0	192.3	209.1	35.4	23.4	25.9	54.5	111.5	250.8	162.0	57.3	1170.5
1984	59.2	90.3	119.0	116.5	21.1	1.2	54.8	83.3	43.2	146.5	90.6	105.8	931.5
1985	60.9	59.4	147.3	191.8	74.7	20.6	21.7	12.3	114.3	103.2	186.7	29.5	1022.4
1986	61.1	110.5	183.5	213.7	84.5	30.1	0.0	6.9	54.9	119.7	97.3	85.7	1047.9
1987	121.8	116.4	199.7	158.8	125.7	48.9	0.0	33.3	235.9	102.6			
MOY.	73.7	92.5	140.9	186.8	110.8	34.9	20.1	47.7	113.8	116.4	126.6	85.8	1142.3
nbre.	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	27.0	27.0	27.0
std.	38.9	37.4	41.5	51.8	49.6	38.1	31.4	33.5	62.1	48.2	49.9	40.7	147.1
MIN.	3.3	26.6	57.8	64.8	21.1	1.2	0.0	6.6	21.4	23.8	41.8	29.5	877.6
MAX.	157.7	170.8	231.4	309.9	205.2	184.7	137.3	135.4	291.3	250.8	237.5	187.0	1496.3

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES

1150.0

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION:KINONI  
 ALT. :1968 m.

LONG.EST:29 44'  
 LAT.SUD : 1 26'

SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1965	17.5	84.9	190.6	163.5	95.9	3.3	0.0	49.0	106.4	154.1	160.1	120.8	1146.1
1966	53.5	81.2	162.2	156.5	54.5	85.8	0.0	104.3	132.7	123.6	68.3	124.3	1146.9
1967	78.6	40.4	47.7	195.6	157.8	59.6	8.5	37.2	169.1	129.5	136.1	83.4	1143.5
1968	43.6	123.8	113.1	185.2	88.1	79.9	19.4	44.5	87.6	116.6	155.8	86.3	1143.9
1969	170.3	148.1	135.6	127.5	132.8	13.6	0.0	24.1	80.4	198.5	111.7	92.8	1235.4
1970	100.1	107.0	128.8	226.5	80.1	10.6	47.8	105.6	51.7	73.4	106.2	89.7	1127.5
1971	42.2	133.2	174.9	111.6	178.3	0.0	0.0	77.0	120.6	158.7	168.0	61.9	1232.7
1972	59.7	80.3	139.5	211.6	218.0	85.7	0.0	87.0	116.6	101.4	190.4	80.8	1371.0
1973	82.6	122.4	62.1	170.9	147.0	1.9	0.0	61.2	133.2	106.5	117.5	105.0	1110.3
1974													
1975	91.7	79.2	129.0	137.9	199.7	49.8	20.6	7.4	190.8	130.7	78.4	86.2	1201.4
1976	19.3	147.2	72.9	85.0	195.0	47.6	15.0	87.5	85.3	71.1	97.8	63.3	987.0
1977	121.8	32.1	160.9	145.3	36.1	78.8	13.1	77.8	130.9	97.2	234.6	54.2	1182.8
1978	51.6	113.3	188.2	104.4	93.6	38.0	3.9	57.9	99.8	183.9	121.2	109.0	1164.8
1979	126.9	119.7	107.9	167.4	116.2	40.9	31.1	95.5	43.7	59.6	108.1	135.2	1152.2
1980	33.1	155.9	71.0	59.3	159.7	67.8	6.3	61.5	154.0	163.3	184.8	52.2	1168.9
1981	93.5	64.9	134.2	119.8	171.0	32.9	49.8	89.8	82.7	137.4	68.6	60.7	1105.3
1982													
1983						29.6	36.2	129.9	133.1	175.1	186.3	51.6	
1984	54.2	75.9	197.1	134.7	70.4	3.5	32.1	64.9	82.0	142.5	101.3	76.6	1034.2
1985	38.7	60.6	101.1	236.8	105.1	62.3	11.6	27.8	179.8	224.6	127.8	57.3	1233.5
1986	47.6	116.1	161.6	163.9	113.9	65.9	0.0	14.8	94.3	130.4	136.5	77.7	1122.7
MOY.	69.8	99.3	130.4	152.8	127.0	42.9	14.8	65.2	113.7	133.9	133.0	83.5	1158.4
nbre.	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.0
std.	38.9	35.3	43.8	45.5	50.5	29.2	16.1	32.1	39.0	42.0	43.2	24.5	78.7
MIN.	17.5	32.1	47.7	59.3	36.1	0.0	0.0	7.4	43.7	59.6	68.3	51.6	987.0
MAX.	170.3	155.9	197.1	236.8	218.0	85.8	49.8	129.9	190.8	224.6	234.6	135.2	1371.0

SOMME DES PREC.MENSUELLES MOYENNES: 1166.2

-----

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION:NTARUKA-1  
 ALT. :1763 m.

LONG.EST:29 45'  
 LAT.SUD : 1 28'

SOURCE:MINITRAPE (R.T.S.)

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1971	66.7	109.6	152.7	191.3	170.2	2.5	17.9	35.7	99.4	173.1	158.7	126.8	1304.6
1972	77.8	100.9	131.6	166.2	185.8	79.3	0.0	37.1	80.2	99.9	167.3	100.6	1226.7
1973													
1974						137.6	0.0	49.4	112.4	73.7	201.6	55.4	
1975	74.8	153.6	114.8	158.7	164.6	34.6	66.8	22.6	184.3	171.8	84.2	103.3	1334.1
1976				137.5	139.7	29.8	13.7	79.8	93.1		169.9	28.0	
1977	58.6	67.1	151.3	312.0	79.3	35.8	9.8	81.2	111.0	105.2	279.2	35.6	1326.1
1978	50.1	139.1	151.6	111.9	102.1	0.0	7.6	35.2	72.4	186.3	102.5	130.1	1088.9
1979		103.9	76.3	65.2	103.1	58.6	45.1	46.1	11.2	61.6	82.0	68.5	
1980	22.1	104.4	74.5	37.5	186.7	45.4	4.0	28.7	191.0	141.8			
1981	127.0	111.2	249.3		223.4		69.2	124.0	204.0	321.7	94.5	163.4	
1982	149.4	74.0	148.0	75.9	131.9	47.4	13.9	64.7	134.9	229.5	278.3	73.5	1421.4
1983	7.1	34.1	66.2	247.3	69.4	20.2	24.7	44.8	173.7	333.5	179.3	23.9	1224.2
1984	9.4	193.9	197.4	295.7	68.4	0.7	0.0	59.2	48.5	115.2	119.0	71.1	1168.5
1985	48.8	42.0	244.7	186.9	81.8	43.6	26.6	1.6	307.9	211.3	117.4	65.6	1378.2
1986	24.7	91.1	144.2	159.0		44.2	0.0	28.0					
MOY.	59.7	101.9	145.6	165.0	131.3	41.4	20.0	49.2	130.3	171.1	156.5	80.4	1274.7
nbre.	12.0	13.0	13.0	13.0	13.0	14.0	15.0	15.0	14.0	13.0	13.0	13.0	9.0
std.	42.2	42.0	55.3	80.6	49.5	34.4	22.4	28.6	73.3	82.8	64.0	40.7	100.0
MIN.	7.1	34.1	66.2	37.5	68.4	0.0	0.0	1.6	11.2	61.6	82.0	23.9	1088.9
MAX.	149.4	193.9	249.3	312.0	223.4	137.6	69.2	124.0	307.9	333.5	279.2	163.4	1421.4

SOMME DES PREC.MENSUELLES MOYENNES: 1252.4

STATION:Ntaruka-2  
 ALT. :1763 m.

LONG.EST:29 45'  
 LAT.SUD : 1 28'

SOURCE:MINITRAPE (COMBARDI)

ANNEE	De JAN.@ AVRIL	De MAI @ AOUT	De SEPT.@ DEC.	TOTAL
1962	380.7	419.4	387.2	1187.3
1963	685.5	290.2	523.2	1498.9
1965	408.7	385.9	477.5	1272.1
1966	453.8	267.2	420.8	1141.8
1967	333.5	329.3	606.2	1269.0
1968	503.9	209.1	389.4	1102.4
1969	604.2	152.2	422.4	1178.8
1970	583.9	234.0	392.7	1210.6
1971	520.3	226.4	544.8	1291.5
1972	490.5	302.2	433.2	1225.9
1973	623.3	260.6	422.1	1314.0
1974	514.5	419.5	443.1	1377.1
1975	432.9	288.6	533.9	1255.4
1976	329.8			
MOY.	490.4	291.7	461.3	1255.8
NBRE	14.0	13.0	13.0	13.0
STD.	104.5	77.5	67.1	99.6
MIN.	329.8	152.2	387.2	1102.4
MAX.	685.5	419.5	606.2	1498.9

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES 1243.4

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)													
STATION:RUHENGERT-PREF.		LONG.EST:29 38'		SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES									
ALT. :1850 m.		LAT.SUD : 1 30'											
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1928	53.5	83.7	120.3	272.0	187.1	54.2	56.8	19.0	94.0	98.6	104.1	115.3	1258.6
1929	55.2	41.5	148.8	197.9	100.7	41.7	68.1	97.0	86.0	168.2	146.2	70.5	1221.8
1930	72.8	91.5	216.0	135.4	164.4	64.4	41.0	120.2	121.1	215.6	122.9	62.8	1428.1
1931	64.3	82.3	132.0	201.7	116.3	34.6	10.6	39.8	128.7	125.5	87.1	103.0	1125.9
1932	74.6	59.3	184.9	68.0	177.2	13.9	90.1	2.5	177.2	220.7	145.4	62.4	1276.2
1933	101.2	45.8	120.6	103.4	136.3	16.8	15.8	112.1	103.1	136.8	146.2	98.1	1136.2
1934	18.3	102.4	111.8	196.3	116.0	29.5	33.8	45.7	66.8	210.5	127.5	93.1	1151.7
1935	35.3	122.2	167.7	84.6	135.5	134.5	0.0	17.4	63.9	129.5	136.5	100.3	1127.4
1936	126.8	139.1	169.6	193.4	155.5	60.8	18.6	7.0	56.6	116.9	81.6	108.1	1234.0
1937	41.6	73.4	187.4	235.5	278.9	74.1	14.8	36.8	41.1	128.8	172.9	108.0	1393.3
1938	48.6	98.9	115.1	183.5	58.5	46.2	30.9	56.7	151.6	177.8	144.7	94.5	1207.0
1939	70.0	75.9	123.0	166.0	141.7	42.5	43.9	41.1	73.5	182.1	80.8	40.0	1080.5
1940	83.5	192.7	120.1	164.7	166.8	26.2	36.1	18.0	44.5	97.4	225.9	80.9	1256.8
1941	95.8	134.2	134.1	158.7	182.6	91.0	10.1	130.5	55.1	111.3	86.8	101.7	1291.9
1942	107.3	113.6	184.6	183.8	171.9	40.4	31.8	121.2	65.9	111.9	156.3	76.8	1365.5
1943	75.4	57.9	88.3	232.5	101.7	87.8	3.5	109.6	92.5	100.6	143.6	67.5	1160.9
1944	61.9	52.5	94.5	124.2	154.2	4.1	3.0	69.7	148.0	177.6	114.9	64.7	1069.3
1945	55.1	54.3	120.0	134.2	163.5	73.8	28.0	75.7	120.1	121.2	148.3	46.4	1140.6
1946	96.1	31.8	93.3	187.4	137.4	13.0	4.3	38.6	106.7	185.4	25.6	83.2	1002.8
1947	121.7	119.5	139.6	318.2	330.9	25.5	14.2	3.0	154.1	137.8	168.5	82.2	1615.2
1948	80.2	135.8	162.0	157.5	70.5	54.5	3.5	78.0	100.5	53.0	76.0	37.0	1008.5
1949	51.5	87.5	152.5	160.0	151.5	22.0	16.5	49.0	117.8	159.5	100.8	41.0	1109.6
1950	17.3	82.5	121.5	200.3	186.9	13.0	0.0	58.4	88.5	120.5	90.6	101.5	1081.0
1951	105.2	141.0	169.5	140.5	206.9	67.0	72.1	76.2	118.5	190.3	196.5	95.3	1579.0
1952	27.2	38.6	61.7	182.2	199.6	39.0	4.5	23.0	196.0	79.9	110.0	53.5	1015.2
1953	105.3	186.3	187.6	253.8	165.4	84.9	4.0	32.1	119.6	101.5	191.2	48.9	1480.6
1954	37.3	110.2	112.9	180.7	175.6	80.9	39.5	68.6	90.8	133.7	129.4	144.7	1304.3
1955	66.2	71.1	206.8	217.2	130.0	26.5	45.7	24.1	221.9	155.9	139.1	104.5	1409.0
1956	84.1	92.4	113.3	228.8	174.2	5.1	0.0	47.7	128.6	191.8	155.8	98.3	1320.1
1957	89.8	81.9	177.6	160.0	168.0	100.8	22.9	60.7	18.4	174.6	104.5	94.7	1253.9
1958	81.6	63.0	158.3	156.5	192.2	41.7	34.1	89.1	86.3	115.6	95.3	147.2	1260.9
1959	68.7	97.5	147.2	169.5	99.8	3.7	1.5	54.1	119.4	175.4	166.4	115.2	1218.4
1960	147.9	97.3	128.6	179.4	31.8	15.2	3.0	74.9	108.8	115.0	126.5	91.7	1120.1
1961	67.1	102.1	171.6	137.0	160.3	20.4	8.0	10.8	177.9	121.8	241.8	187.8	1406.2
1962	75.7	107.0	106.3	148.7	141.0	91.8	8.0	49.1	150.2	261.6	192.0	108.9	1440.3
1963	140.0	115.6	183.0	458.3	249.0	67.6	2.0	11.0	153.2	136.5	141.8	143.2	1801.2
1964	78.0	161.9	167.0	274.4	96.2	57.3	29.0	11.0	32.0	170.3	138.0	183.5	1398.6
1965	67.4	123.0	259.8	148.0	70.0	36.5	2.0	77.5	106.5	164.5	157.3	96.0	1308.5
1966	62.2	139.8	111.8	205.0	123.0	73.0	2.0	100.0	148.0	190.0	108.0	82.0	1344.8
1967	43.5	63.5	126.9	156.5	235.0	52.5	16.5	5.5	188.0	165.0	141.5	84.5	1278.9
1968	23.0	163.0	185.0	259.0	111.0	147.0	18.0	60.0	56.0	150.5	211.0	69.5	1453.0
1969	203.5	244.0	232.0	234.0	217.0	6.0	0.0	17.0	28.5	84.5	149.0	217.0	1632.5
1970	107.0	67.0	85.0	320.5	126.0	26.0	65.0	56.0	70.0	118.5	150.5	90.5	1282.0
1971	143.0	76.0	150.5	255.5	285.0	2.0	81.0	48.0	153.0	229.5	243.0	97.0	1763.5
1972	99.0	113.1	159.7	323.3	168.9	165.1	0.0	56.9	47.6	110.7	237.4	75.8	1557.5
1973	69.9	81.9	78.8	320.1	202.6	2.0	0.0	42.2	215.8	127.4	222.7	131.5	1494.9
1974	53.4	129.2	198.9	230.2	164.9	156.4	96.7	29.3	102.1	108.0	224.3	185.6	1679.0
1975	110.9	101.9	180.7	249.6	278.9	21.7	58.2	46.5	265.9	305.0	133.8	141.8	1894.9
1976	97.5	201.4	88.5	180.2	53.0	7.3	120.4	165.0	137.5	166.3	219.8	131.1	1568.0

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)													
STATION:RUHENGERRI-PREF.	LONG.EST:29 38'												
ALT. :1850 m.	LAT.SUD : 1 30'												
SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES													
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1977	121.5	124.3	148.1	248.2	181.5	60.5	0.5	73.6	168.4	100.5	269.7	82.5	1579.3
1978	88.1	141.6	217.2	219.2	182.9	41.0	0.0	53.0	128.1	210.1	188.6	131.0	1600.8
1979	170.1	109.0	128.5	186.5	235.3	86.0	7.5	48.0	96.0	185.3	174.7	186.8	1613.7
1980	66.0	156.3	158.2	177.3	319.1	46.2	4.0	72.0	117.6	247.3	240.1	60.4	1664.5
1981	74.5	52.6	156.5	132.9	188.0	29.7	18.7	86.3	127.6	144.6	110.2	79.3	1200.9
1982		101.0	111.9	311.4	144.1	108.2	0.0	75.6	139.7	147.5	96.0		106.2
1983	6.0	65.1	129.4	256.9	58.7	31.0	26.3	75.3	164.6	192.2	172.5	65.5	1243.5
1984	42.7	92.0	132.9	165.3	25.3	0.9	89.0	58.1	52.9	173.1	172.2	67.8	1072.2
1985	84.1	34.4	104.2	191.3	156.8	43.6	16.2	19.0	144.2	150.3	159.6	70.5	1174.2
1986	66.5	95.3	162.3	161.3	132.8	56.7	0.0	8.7	74.3	154.3	172.3	72.2	1156.7
MOY.	79.0	102.0	145.9	201.3	159.9	50.3	24.9	55.1	113.7	153.2	151.1	98.0	1333.0
NBRE	58.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	58.0
STD.	37.3	43.0	40.2	66.7	64.2	38.7	28.9	35.1	50.8	47.1	49.8	38.9	214.4
MIN.	6.0	31.8	61.7	68.0	25.3	0.9	0.0	2.5	18.4	53.0	25.6	37.0	1002.8
MAX.	203.5	244.0	259.8	458.3	330.9	165.1	120.4	165.0	265.9	305.0	269.7	217.0	1894.9
SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES													1334.5

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)													
STATION:RUHENGERRI-AERO	LONG.EST:29 38'												
ALT. :1868 m.	LAT.SUD : 1 30'												
SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES													
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1977				211.1	145.6	51.5	25.5	76.5	223.6	103.5	237.1	54.1	
1978	88.9	121.0	171.8	177.3	141.8	37.8	0.4	48.3	119.4	186.1	134.5	106.6	1333.9
1979	158.0	99.2	107.8	151.4	136.6	71.7	7.5	55.0	79.9	169.3	141.4	105.0	1282.8
1980	38.7	118.2	75.0	132.3	253.0	37.3	0.7	71.9	139.7	171.3	161.8	60.4	1260.3
1981	74.5	52.6	156.5	132.9	188.0	29.7	18.7	86.3	127.6	144.6	110.2	79.3	1200.9
1982	84.5	57.1	111.9	311.7	144.1	108.2	1.3	75.6	139.7	157.4	95.0		106.7 1393.2
1983	6.0	65.1	129.4	256.9	58.7	31.0	26.3	75.3	164.6	192.2	172.5	65.5	1243.5
1984	42.7	92.0	132.9	165.3	25.3	0.9	89.0	58.1	52.9	173.1	172.2	67.8	1072.2
1985	84.1	34.4	104.2	191.3	156.8	43.6	16.2	19.0	144.2	150.3	159.6	70.5	1174.2
1986	66.5	95.3	162.3	161.3	132.8	56.7	0.0	8.7	74.3	154.3	172.3	72.2	1156.7
1987	78.5	56.7	162.3	233.2	136.6	66.6	1.6	57.4	239.6	162.7			
MOY.	72.2	79.2	131.4	193.2	138.1	48.6	17.0	57.5	136.9	160.4	155.7	78.8	1235.3
nbre.	10.0	10.0	10.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	10.0	10.0	9.0
std.	37.9	28.3	30.1	53.2	56.6	26.4	24.8	23.3	55.2	22.7	37.3	19.0	91.5
MIN.	6.0	34.4	75.0	132.3	25.3	0.9	0.0	8.7	52.9	103.5	95.0	54.1	1072.2
MAX.	158.0	121.0	171.8	311.7	253.0	108.2	89.0	86.3	239.6	192.2	237.1	106.7	1393.2
SOMME DES PREC.MENSUELLES MOYENNES													1269.0

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION: KINIGI      LONG. EST: 29 35'      SOURCE: BULLETINS CLIMATOLOGIQUES  
 ALT. : 2200 m.      LAT. SUD : 1 27'

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1944								112.0	184.6	200.8	204.9	79.2	
1945	60.0	70.0	167.4	190.2	227.3	98.9	25.0	83.0	113.9	147.6	200.6	57.0	1440.9
1946	127.0	74.1	140.4	262.0	465.5	69.8	9.6	30.0	135.3	122.7	84.1	60.6	1581.1
1947	119.6	141.5	191.0	242.5	296.8	66.0	52.0	0.0	146.1	185.0	121.0	105.5	1667.0
1948	125.5	187.0	213.0	267.3	171.0	60.0	9.0	67.0	103.0	90.0	142.0	61.0	1495.8
1949	117.0	123.0	183.0	330.0	156.0	42.0	44.0	54.0	141.0	152.0	63.0	79.0	1484.0
1950	80.0	108.0	132.0	233.0	212.3	70.2	3.0	51.0	125.0	122.0	106.0	171.0	1413.5
1951	158.0	141.0	297.0	239.0	315.0	116.0	40.0	65.0	76.0	140.0	255.0	210.0	2052.0
1952	10.0	46.0	134.0	313.3	333.7	60.0	50.0	71.3	144.0	64.0	164.3	81.8	1472.4
1953	120.2	143.6	209.8	272.5	176.8	69.7	7.2	69.3	120.6	85.4	105.4	65.3	1445.8
1954	41.8	120.8	153.1	326.1	246.8	138.7	30.0	61.8	82.4	134.2	172.4	223.7	1731.8
1955	188.9	93.4	218.9	230.2	136.7	2.6	86.5	28.9	182.8	143.2	114.7	169.0	1595.8
1956	89.7	215.4	121.7	286.0	230.7	9.9	0.0	94.4	158.0	224.2	143.3	117.1	1690.4
1957	110.6	133.5	278.1	206.2	175.3	154.9	56.2	35.7	58.8	228.6	123.0	149.5	1710.4
1958	119.7	95.4	231.7	247.6	325.4	52.2	45.4	110.2	89.4	166.0	157.0	155.2	1795.2
1959	85.6	98.2	160.3	222.6	177.8	20.0	0.0	101.4	86.6	217.2	226.4	230.9	1627.0
1960	112.4	172.2	181.6	249.8	115.2	11.4	5.4	71.2	135.0	122.2	176.0	48.4	1400.8
1961	82.2	137.0	223.4	140.4	195.6	23.8	6.8	10.4	224.8	133.8	320.1	205.7	1704.0
1962	92.6	30.5	165.6	197.2	180.5	78.5	24.3	88.0	142.7	227.5	172.5	136.1	1536.0
1963	189.0	144.0	141.0	498.2	403.0	78.0	5.0	27.0	168.5	129.0	153.0	194.0	2129.7
1964	75.0	99.5	182.5	237.0	99.5	65.5	65.5	6.0	87.5	141.0	78.0	71.0	1208.0
1965	51.0	90.5	193.5	151.0	110.5	28.0	0.0	77.5	89.9	168.6	154.9	146.1	1261.5
1966	111.0	169.0	153.4	157.0	110.3	78.7	7.7	160.0	96.8	150.5	137.4	98.7	1430.5
1967	62.7	109.5	137.4	290.2	258.8	71.8	6.7	22.9	177.9	110.6	286.4	87.5	1622.4
1968	136.1	214.2	212.5	243.4	98.1	211.1	39.0	27.8	78.1	95.0	196.8	118.8	1670.9
1969	175.1	200.3	163.9	201.7	163.7	21.3	2.5	35.9	55.3	97.4	100.7	102.5	1320.3
1970	88.3	252.4	229.2	231.9	223.2	11.5	86.1	50.3	50.4	81.9	143.5	78.7	1527.4
1971	127.4	78.6	193.5	224.4	229.1	39.6	129.6	64.1	99.0	189.5	168.0	124.1	1666.9
1972	97.3	106.8	256.1	278.3	185.2	162.6	2.5	77.7	149.1	139.2	168.9	101.8	1725.5
1973	85.1	196.1	81.9	227.2	220.0	43.0	2.0	54.4	172.2	149.8	166.3	114.7	1512.7
1974	134.0	146.1	198.6	193.1	125.0	127.5	68.3	65.1	130.3	94.8	274.2	72.0	1629.0
1975	137.0	98.6	108.0	155.5	234.3	49.8	61.4	38.7	171.1	196.2	87.3	154.4	1492.3
1976													
1977													
1978													
1979													
1980													
1981													
1982					182.0	123.8	9.3	49.1	100.5	151.3			113.5
1983	10.9	133.9	226.7	297.6	123.7	35.2	65.2	113.2	161.3	159.9	180.2	97.4	1605.2
1984	39.0	134.9	157.5	235.0	43.4	5.9	69.8	55.3	68.1	187.1	232.7	138.9	1367.6
1985	142.3	84.9	142.4	254.8	228.9	96.0	1.0	32.7	83.6	157.7	142.4	109.1	1475.8
1986	74.6	132.2	166.5	264.2	184.8	110.7	7.8	22.8	96.9	213.6	161.7	157.3	1593.1
MOY.	102.2	129.2	181.3	245.6	204.5	69.6	31.2	59.1	121.3	149.2	163.4	121.3	1573.8
NBRE	35.0	35.0	35.0	35.0	36.0	36.0	36.0	37.0	37.0	37.0	36.0	37.0	35.0
STD.	43.3	48.7	46.5	63.5	66.5	48.5	31.9	33.6	41.9	43.4	58.3	48.9	186.5
MIN.	10.0	30.5	81.9	140.4	43.4	2.6	0.0	0.0	50.4	64.0	63.0	48.4	1208.0
MAX.	189.0	252.4	297.0	498.2	465.5	211.1	129.6	160.0	224.8	228.6	320.1	230.9	2129.7

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES      1577.8

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION:KARISOKE  
 ALT. :3150 m.

LONG.EST:29 28'  
 LAT.SUD : 1 28'

SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1979	175.4	173.0	218.4	367.7	230.9	151.6	37.7	165.8	78.5	173.8	148.3	174.7	2095.8
1980	34.2	73.2	179.2	260.6	257.8	85.1	51.0	110.1	133.7	182.1	231.1	123.9	1722.0
1981	135.7	60.8	326.3	348.3	79.1	58.1	166.1	234.3	191.2	180.3	139.9	100.1	2020.2
1982	89.4	130.0	136.3	304.5	288.4	159.9	29.3	88.5	239.9	162.8	230.7	178.7	2038.4
1983	15.5	85.8	205.0	306.2	140.3	103.9	114.3	186.5	184.8	337.1	163.4	157.2	2000.0
1984	102.5	140.9	169.5	240.5	78.0	14.7	154.3	118.7	96.8	214.4	218.1	124.3	1672.7
1985	155.1	149.1	226.9	333.5	281.6	67.7	0.0	57.4		170.1	188.0		
MOY.	101.1	116.1	208.8	308.8	193.7	91.6	79.0	137.3	154.2	202.9	188.5	143.2	1924.9
NBRE	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.0	7.0	7.0	6.0	6.0
STD.	55.5	39.6	56.0	42.5	85.8	47.9	60.6	56.7	56.4	56.8	36.0	29.0	164.1
MIN.	15.5	60.8	136.3	240.5	78.0	14.7	0.0	57.4	78.5	162.8	139.9	100.1	1672.7
MAX.	175.4	173.0	326.3	367.7	288.4	159.9	166.1	234.3	239.9	337.1	231.1	178.7	2095.8

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES 1925.1

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION:MUSANZE  
 ALT. :1875 m.

LONG.EST:29 37'  
 LAT.SUD : 1 30'

SOURCE:BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1982	86.6	60.6	269.9	148.5	135.6	3.1							147.5
1983	5.1	79.9	155.6	274.1	52.3	27.0	57.8	44.6	199.9	183.5	169.1	58.7	1307.6
1984	59.7	89.1	123.6	237.1	18.9	2.4	12.0	57.1	52.0	172.4	200.0	60.9	1085.2
1985	81.7	60.6	133.0	164.3	195.6	36.2	34.9	17.6	133.6	59.6	188.7	76.5	1182.3
1986	69.1	94.5	222.7	173.2	125.1	69.7	0.0	9.3	77.0	145.2	179.7	100.6	1266.1
MOY.	60.4	76.9	181.0	199.4	105.5	27.7	26.2	32.2	115.6	140.2	184.4	88.8	1210.3
NBRE	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0
STD.	29.2	14.1	56.4	48.0	62.8	24.8	22.1	19.4	56.9	48.6	11.4	32.9	85.2
MIN.	5.1	60.6	123.6	148.5	18.9	2.4	0.0	9.3	52.0	59.6	169.1	58.7	1085.2
MAX.	86.6	94.5	269.9	274.1	195.6	69.7	57.8	57.1	199.9	183.5	200.0	147.5	1307.6

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES 1238.3

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION: MUKINGO      LONG. EST: 29 34'  
 ALT. : 2050 m.      LAT. SUD : 1 31'      SOURCE: BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1964										184.6	152.0		
1965	62.4	49.5	103.6	116.1	67.8	20.9	0.0	83.0	103.2	135.5	199.4	132.3	1073.7
1966	44.8	92.4	175.5	116.7	19.6	66.1	0.0	102.6	237.5	187.8	180.8	39.8	1263.6
1967	49.6	68.1	107.9	235.6	284.8	72.0	0.0	0.0	146.1	249.8	-232.1	125.6	1571.6
1968	33.7	121.3	172.1	229.2	56.2	126.9	53.0	35.3	109.3	160.8	214.2	123.9	1435.9
1969	59.8	231.5	199.1	146.7	66.3	0.0	0.0	32.0	42.1	67.7	210.7	86.5	1142.4
1970	91.2	132.8	83.2	240.3	128.5	0.0	96.0	30.1	78.4	79.5	141.4	74.7	1176.1
1971	86.5	65.5	209.9	221.4	198.1	10.0	114.6	69.6	83.5	142.4	146.3	76.1	1423.9
1972	109.1	81.7	101.7	225.7	113.3	110.5	0.0	60.4	71.5	123.4	157.7	162.2	1317.2
1973	36.1	64.5	100.2	190.5	168.0	0.0	0.0	24.5	212.2	102.2	113.4	107.5	1119.1
1974	76.4	96.3	183.0	171.2	113.7	120.2	104.3	75.4	107.5	72.4	139.8	79.7	1339.9
1975	102.8	74.6	105.1	173.3	181.5	9.1	56.5	51.5	121.3	211.3	149.8	71.9	1308.7
1976	66.4	128.0	100.9	144.8	160.0	61.5	23.1	62.7	121.2	93.7	125.6	86.0	1173.9
1977	81.6	112.1	100.9	112.9	87.2	36.0	46.6	64.5	99.6	100.2	195.7	57.1	1094.4
1978	83.5	125.5	176.4	155.4	115.0	25.7	0.5	51.5	89.9	146.8	203.7	85.6	1259.5
1979	115.7	55.0	133.5	210.5	171.8	81.8	5.5	89.5	34.3	99.4	239.7	91.2	1327.9
1980	28.5	92.2	87.8	120.5	228.0	17.0	5.0	29.0	107.5	111.0	90.5	39.8	956.8
1981	51.0	41.8	94.6	114.7	125.5	22.3	25.0	72.5	106.0	112.8	115.5	29.7	911.4
1982	103.2	77.5	61.4	225.4	112.5	93.8	30.8	77.5	112.5	67.0	111.0	89.6	1162.2
1983	3.5	42.0	138.5	217.3	141.0	43.4	45.7	82.1	197.0	165.1	71.0	50.0	1196.6
1984	42.3	60.7	81.5	36.5	22.2	0.0	33.5	49.1	90.8	173.7	173.8	61.2	825.3
1985	76.0	81.7	70.4	164.0	144.6	37.7	52.0	41.0	124.0	143.4	109.0	29.8	1073.5
1986	82.2	37.4	165.5	149.0	102.9	42.0	0.0	8.0	46.8	132.7	128.6	80.1	975.2
MOY.	67.6	87.8	125.1	169.0	127.7	45.3	31.5	54.2	111.0	133.2	156.6	80.9	1187.7
NBRE	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	23.0	23.0	22.0	22.0
STD.	28.5	42.3	43.6	52.2	62.5	39.8	35.5	26.3	49.8	46.7	45.4	33.5	178.2
MIN.	3.5	37.4	61.4	36.5	19.6	0.0	0.0	0.0	34.3	67.0	71.0	29.7	825.3
MAX.	115.7	231.5	209.9	240.3	284.8	126.9	114.6	102.6	237.5	249.8	239.7	162.2	1571.6

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES: 1189.8

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION: NYAKINAMA-UHR      LONG. EST: 29 38'  
 ALT. : 1750 m.      LAT. SUD : 1 32'      SOURCE: BULLETINS CLIMATOLOGIQUES

ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
1983	16.6	119.5	134.0	249.8	64.1	35.5	34.0	67.3	172.2		282.0	99.1	
1984	66.7	81.9	140.2	15.3	43.5	0.0	18.8	52.5	73.9	225.2	221.5	56.0	995.5
1985	80.4	59.0	157.4	134.7	84.0	18.4	16.0	17.0	196.0	117.4	110.6	47.6	1038.5
1986	33.5	94.1	163.8	127.9	151.5	53.6	0.0	0.0	44.6	149.1	139.1	55.1	1012.3
MOY.	49.3	88.6	148.9	131.9	85.8	26.9	17.2	34.2	121.7	163.9	188.3	64.5	1015.4
NBRE	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0	3.0
STD.	25.4	21.8	12.2	82.9	40.6	19.9	12.1	26.9	63.8	45.2	67.7	20.3	17.7
MIN.	16.6	59.0	134.0	15.3	43.5	0.0	0.0	0.0	44.6	117.4	110.6	47.6	995.5
MAX.	80.4	119.5	163.8	249.8	151.5	53.6	34.0	67.3	196.0	225.2	282.0	99.1	1038.5

SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES 1121.1

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)  
 STATION:BULERA                      LONG.EST:29 46'  
 ALT. :1862 m.                        LAT.SUD : 1 28'                      SOURCE:MINITRAPE (LOMBARDI)  
 -----

ANNEE	De JAN. & AVRIL	De MAI & AOÛT	De SEPT. & DEC.	TOTAL
1970	493.1	199.5	274.4	967.0
1971	431.7	229.5	417.7	1078.9
1972	564.0	274.5	535.9	1374.4
1973	359.6	233.9	501.2	1094.7
1974	382.1	359.0	452.0	1193.1
1975	427.6	238.1	437.9	1103.6
1976	329.5	348.3	309.2	987.0
1977	393.3	238.4	389.9	1021.6
1978	497.7	159.5	540.9	1198.1
1979	445.6	301.9	355.3	1102.8
1980	372.0	350.2	489.9	1212.1
1981	415.8	362.5	327.4	1105.7
1982				
1983				
1984				
1985				
1986	486.4	269.0	429.1	1184.5
MOY.	426.0	274.6	419.3	1119.9
NBRE	12.0	12.0	12.0	12.0
STD.	63.8	65.8	85.6	107.4
MIN.	329.5	159.5	274.4	967.0
MAX.	564.0	362.5	540.9	1374.4
SOMME DES PREC. MENSUELLES MOYENNES				1119.9

-----  
 DONNEES DE PRECIPITATION(mm)  
 STATION:MEMBA                      LONG.EST:29 47'  
 ALT. :1570 m.                        LAT.SUD : 1 38'                      SOURCE:RRAM (WASH)  
 -----

ANNEE	TOTAL
1971	1350.0
1972	1501.0
1973	1734.0
1974	1850.0
1975	1545.0
1976	1372.0
1977	1724.0
1978	1534.0
1979	1643.0
1980	1384.0
1981	1569.0
1982	1697.0
1983	1570.0
1984	1416.0
1985	1385.0
1986	1395.4
MOY.	1541.8

STATION:RWANKERI  
ALT. :2250 m.

DONNEES DE PRECIPITATION(mm)  
LONG.EST:29 32'  
LAT.SUD : 1 35'

SOURCE:RRAM (WASH)

ANNEE	TOTAL
1937	1519.0
1938	1232.0
1939	1218.0
1940	1240.0
1941	1590.0
1942	1382.0
1943	1155.0
1944	1083.0
1945	1257.0
1946	1224.0
1947	1314.0
1948	1040.0
1949	1135.0
1950	1169.0
1951	
1952	1353.0
1953	1353.0
1954	1181.0
1955	1210.0
1956	1409.0
1957	1020.0
1958	1022.0
1959	232.0
1960	
1961	
1962	1172.0
1963	1449.0
1964	1342.0
1965	1293.0
1966	1329.0
1967	1102.0
1968	
1969	1026.0
1970	
1971	1537.0
1972	
1973	1104.0
1974	
1975	1388.0
1976	
1977	
1978	1290.0
1979	1373.0
1980	1039.0
1981	1251.0
1982	
1983	
1984	1005.0
1985	1270.0

-----  
DONNEES DE PRECIPITATION(mm)

STATION:RWANKERI

LONG.EST:29 32'

ALT. :2250 m.

LAT.SUD : 1 35'

SOURCE:RRAM (WASH)

-----

ANNEE	TOTAL
1986	1287.7
MOY.	1220.4
NBRE	39.0
STD.	217.9
MIN.	232.0
MAX.	1590.0

DONNEES DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

I. LES PRECIPITATIONS EN Mm et dixièmes

TOTAUX MENSUELS ET ANNUELS

RR : Total mensuel et annuel

RR̄ : Moyenne calculée sur (x) années

N : Nombre de jours de pluie

RRx/d : Maximum en 24 heures et d = date

RWANKERI (36)  $29^{\circ}32'E$   
2250 m.  $1^{\circ}35'S$

MULINDI (18)  $30^{\circ}03'E$   
2100 m.  $1^{\circ}28'S$

MOIS	RR	RR̄	N	RRx/d
J	71.0	75.1	5	30.0/15
F	97.6	98.1	11	27.0/2
M	149.0	137.4	10	48.0/5
A	247.0	192.3	15	40.0/27
M	113.8	153.4	9	22.1/24
J	50.9	42.2	6	26.0/2
Jt	NT	17.5	NT	NT
A	NT	50.5	NT	NT
S	57.6	114.8	7	15.4/23
O	177.5	131.5	16	30.3/10
N	204.2	143.5	17	26.4/11
D	119.1	96.2	12	27.0/7
A	1287.7	1252.5	108	48.0/5/3

RR	RR̄	N	RRx/d
106.8	87.7	8	26.6/1
120.0	100.6	9	37.6/4
122.2	140.0	18	27.4/6
265.1	204.5	26	47.6/3
72.6	144.3	15	13.2/14
34.2	45.1	5	14.2/1
NT	18.1	NT	NT
9.4	71.1	4	5.6/31
56.2	103.2	12	13.5/17
70.0	94.8	16	8.3/24
170.1	139.4	18	47.7/1
93.8	88.3	15	21.0/21
1120.4	1237.1	146	47.7/1/11

RWAZA (49)  $29^{\circ}41'E$   
ALT: 1800m  $1^{\circ}32'S$

$29^{\circ}41'E$   
 $1^{\circ}35'S$  MURAMBA - CYABINGO (13)  
~1800m

J	67.7	77.8	10	12.0/3
F	67.6	92.6	12	10.2/12
M	164.6	141.7	17	31.1/31
A	226.7	202.7	22	27.9/20
M	164.5	158.0	17	30.0/18
J	50.4	35.2	6	20.8/6
Jt	NT	21.8	NT	NT
A	20.2	45.5	1	20.2/30
S	106.3	105.2	14	32.8/8
O	169.2	155.5	18	22.1/24
N	235.6	149.5	22	35.5/11
D	92.6	98.3	11	18.4/12
A	1367.4	1283.8	150	33.5/1/11

88.1	94.9	10	18.0/21
153.9	92.5	12	38.0/4
179.7	137.1	16	37.0/3
266.7	199.8	22	45.6/24
117.8	153.2	18	20.0/18
45.3	42.8	7	16.5/1
NT	20.5	NT	NT
9.9	49.8	1	9.9/30
166.0	120.3	13	36.0/7
212.4	135.9	17	22.4/26
157.7	193.8	17	26.0/6
165.0	107.9	17	20.5/18
1562.5	1348.5	150	45.6/24/4

MOIS	RR	RR	N	RRx/d	RR	RR	N	RRx/d
	NEMBA (11) 29°47'E 1570m 1°38'S				BULERA-LAC (11) 29°46'E 1862m 1°28'S			
J	126.1	108.5	14	33.9/3	44.4	76.4	13	10.2/30
F	133.0	139.3	19	17.6/15	163.1	92.5	17	37.5/12
M	156.4	155.4	21	24.5/4	137.2	184.1	20	24.0/30
A	279.1	223.3	27	62.9/20	175.0	133.4	27	28.4/3
M	139.0	190.4	20	22.6/24	137.4	123.5	19	23.0/1
J	24.6	63.0	7	12.7/1	108.5	48.3	10	25.5/21
Jt	NT	19.3	NT	NT	0.0	26.3	1	0.0/28
A	2.6	53.7	1	2.6/29	20.8	70.9	4	11.5/29
S	78.6	123.9	12	23.7/3	94.8	110.3	15	21.6/2
O	172.4	142.1	21	24.6/9	179.9	113.4	21	26.2/19
N	204.0	210.5	25	24.9/11	-	117.6	-	-
D	79.6	131.7	17	12.3/25	49.9	87.8	14	09.0/14
A	1395.4	1561.0	184	62.9/20/4	-	1184.5	-	-

MOIS	RR	RR	N	RRx/d	RR	RR	N	RRx/d
	RAMBURA (26) 29°31'E 2300m 1°41'S				REMERA (4) 29°43'E ~1950 1°32'S			
J	80.5	98.3	19	20.4/1	84.1	79.0	8	24.8/3
F	141.8	118.3	25	39.5/20	74.5	95.1	17	10.6/3
M	82.6	129.4	24	11.7/27	163.1	140.9	27	39.0/3
A	93.3	198.4	27	25.6/1	163.0	153.8	26	26.0/20
M	257.3	190.6	30	21.6/5	117.6	114.9	25	20.2/15
J	75.5	52.5	15	12.4/9	54.4	24.4	8	18.2/6
Jt	NT	29.1	NT	NT	NT	9.8	NT	NT
A	0.3	62.5	2	0.3/28	21.1	92.4	2	20.0/29
S	32.7	120.0	12	11.2/1	92.6	132.0	15	18.6/3
O	182.1	143.9	25	31.7/12	207.6	149.5	19	27.0/23
N	139.4	150.0	26	29.4/22	160.3	131.7	22	18.7/20
D	92.0	114.7	20	10.4/11	73.0	83.8	13	10.7/19
A	1177.5	1415.7	225	39.5/20/2	1211.3	1207.3	184	39.0/3/3

MOIS	RR	RR	N	RRx/d
	BYUMBA (50) 30°03'E 2235m 1°36'S			
J	87.1	78.7	16	22.6/1
F	76.9	109.3	15	18.2/13
M	133.9	146.4	25	27.5/6
A	287.0	222.7	27	57.4/8
M	134.2	161.0	24	22.4/8
J	28.1	32.4	7	11.8/6
Jt	NT	18.5	NT	NT
A	10.9	40.6	2	10.6/29
S	101.9	105.8	13	17.8/8
O	88.6	137.6	12	35.8/8
N	112.0	139.0	25	14.2/26
D	103.9	93.7	16	37.0/25
A	1164.5	1285.7	182	57.4/8/4

=====

TABLEAU : REGRESSION LINEAIRE ALT. vs. PREC.

STATION	PREC.	ALT.
RUH-PRE	1333	1850
RWANBERI	1220	2250
KINIGI	1374	2200
RUHUNDE	1310	2275
RWE-M	1142	2114
RWE-C	1212	2350
KINONI	1153	1968
MUKINGU	1185	2050
BULERA	1120	1862
NEMBA	1542	1570
RUH-AERO	1235	1866
KARISOKE	1925	3150
MUSANZE	1210	1875
UNR	1015	1750
NTARUKA	1275	1763
MULINDI	1237	2100
RWAZA	1284	1800
CYABINGU	1348	1800
RAMBURA	1416	2300
BYUMBA	1286	2235
RENERA	1207	1950

Regression Output:

Constant	601,4055
Std Err of Y Est	162,1476
R Squared	0,336140
No. of Observations	21
Degrees of Freedom	19
X Coefficient(s)	0,339077
Std Err of Coef.	0,109320

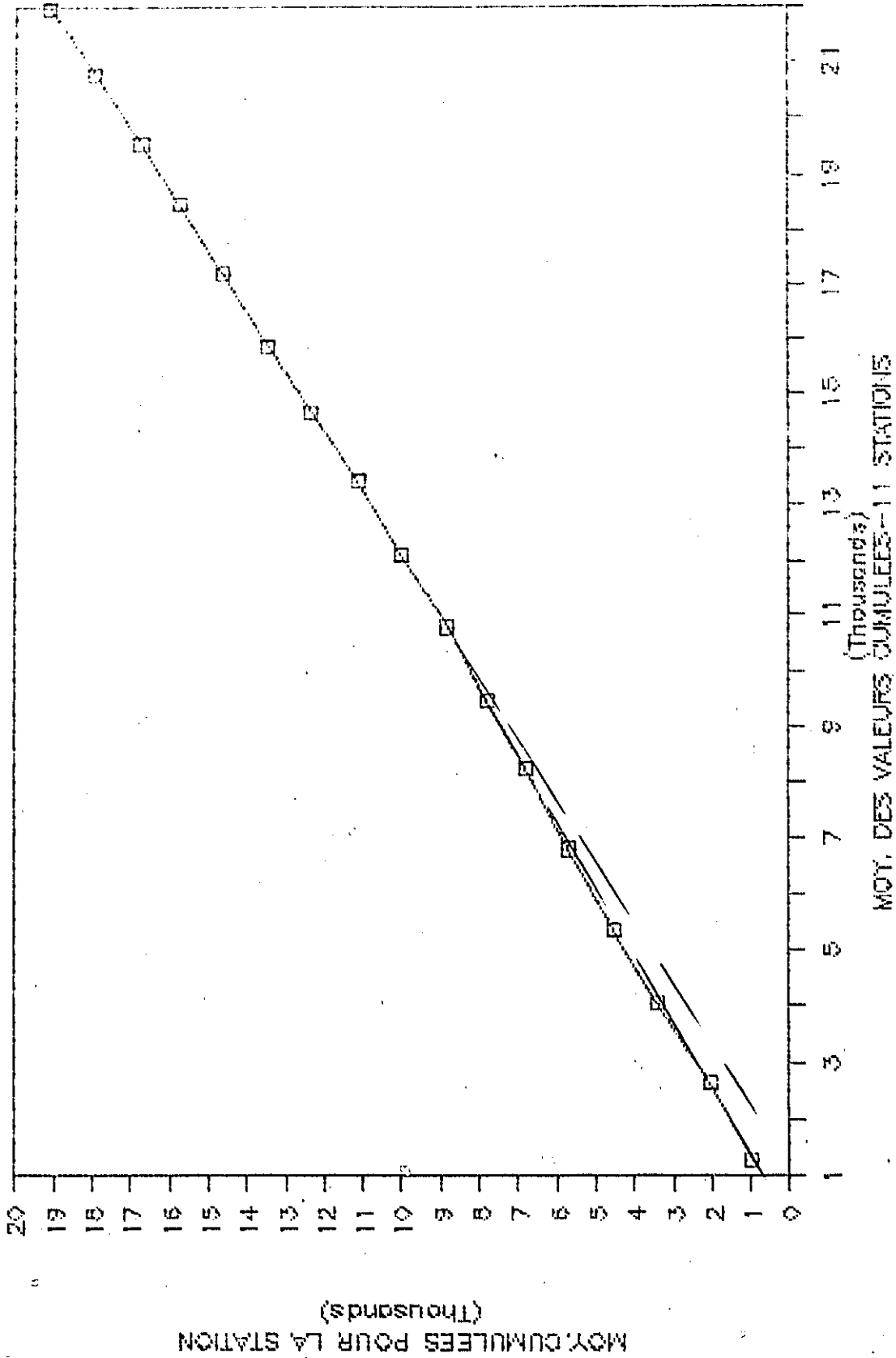
=====

**ANNEXE B**

**COURBES CUMULATIVES DES PRECIPITATIONS**

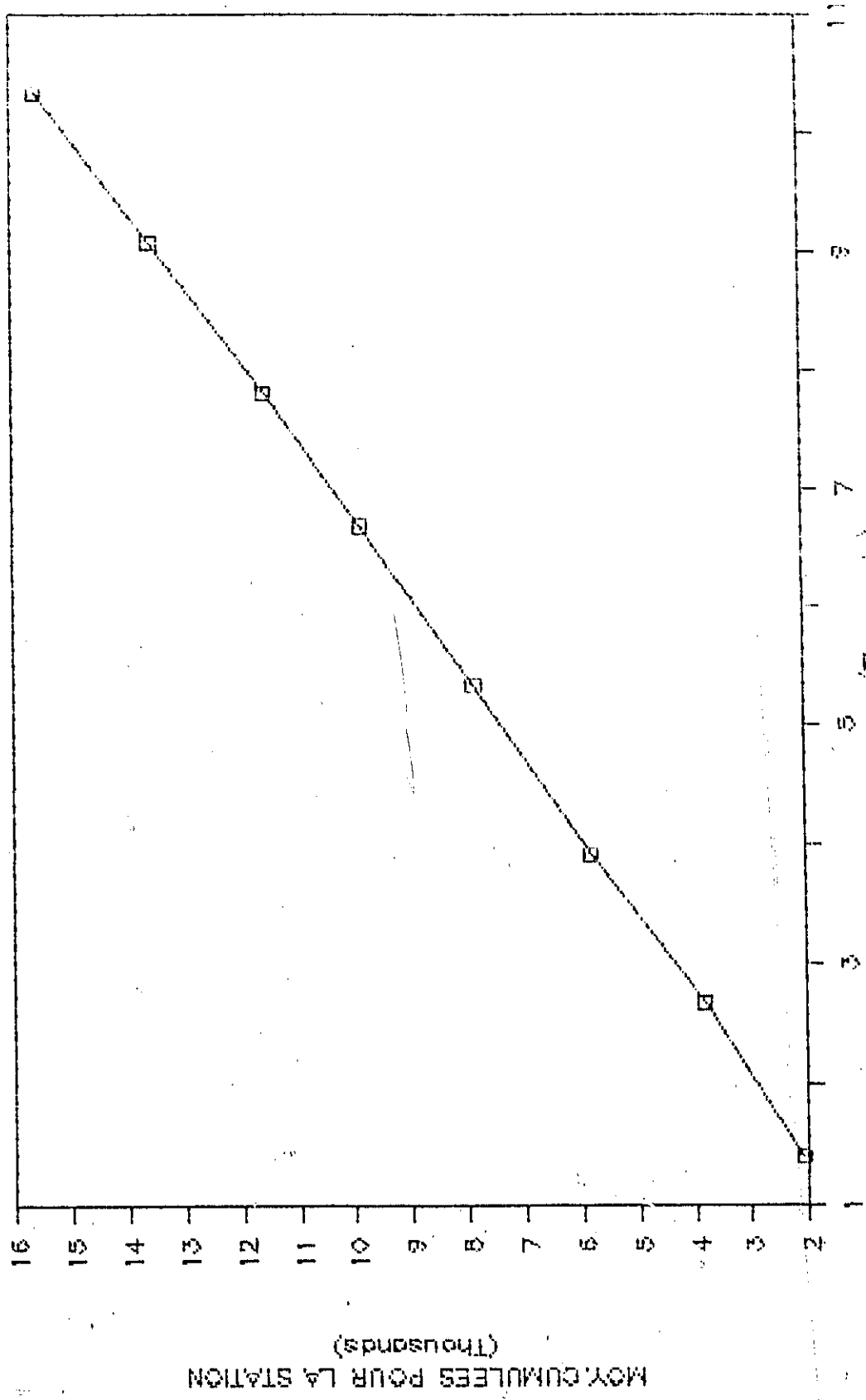
# ANALYSE DE MASSE 1970 © 1986

BULEFA - LAG



# ANALYSE DE MASSE 1979 @ 1986

KARISOKE

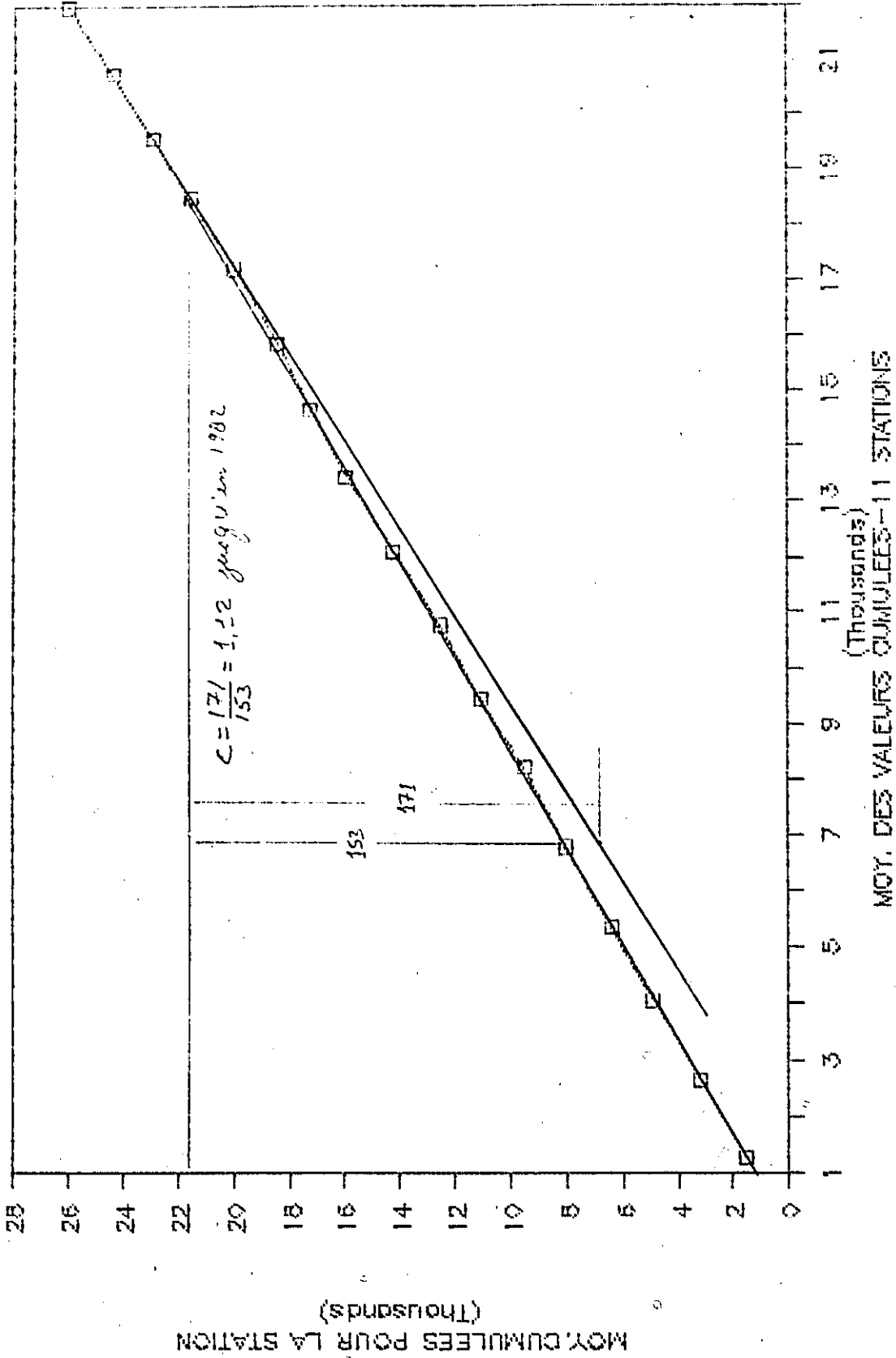


MOY. DES VALEURS CUMULEES - 10 STATIONS  
(Thousands)

MOY. CUMULEES POUR LA STATION  
(Thousands)

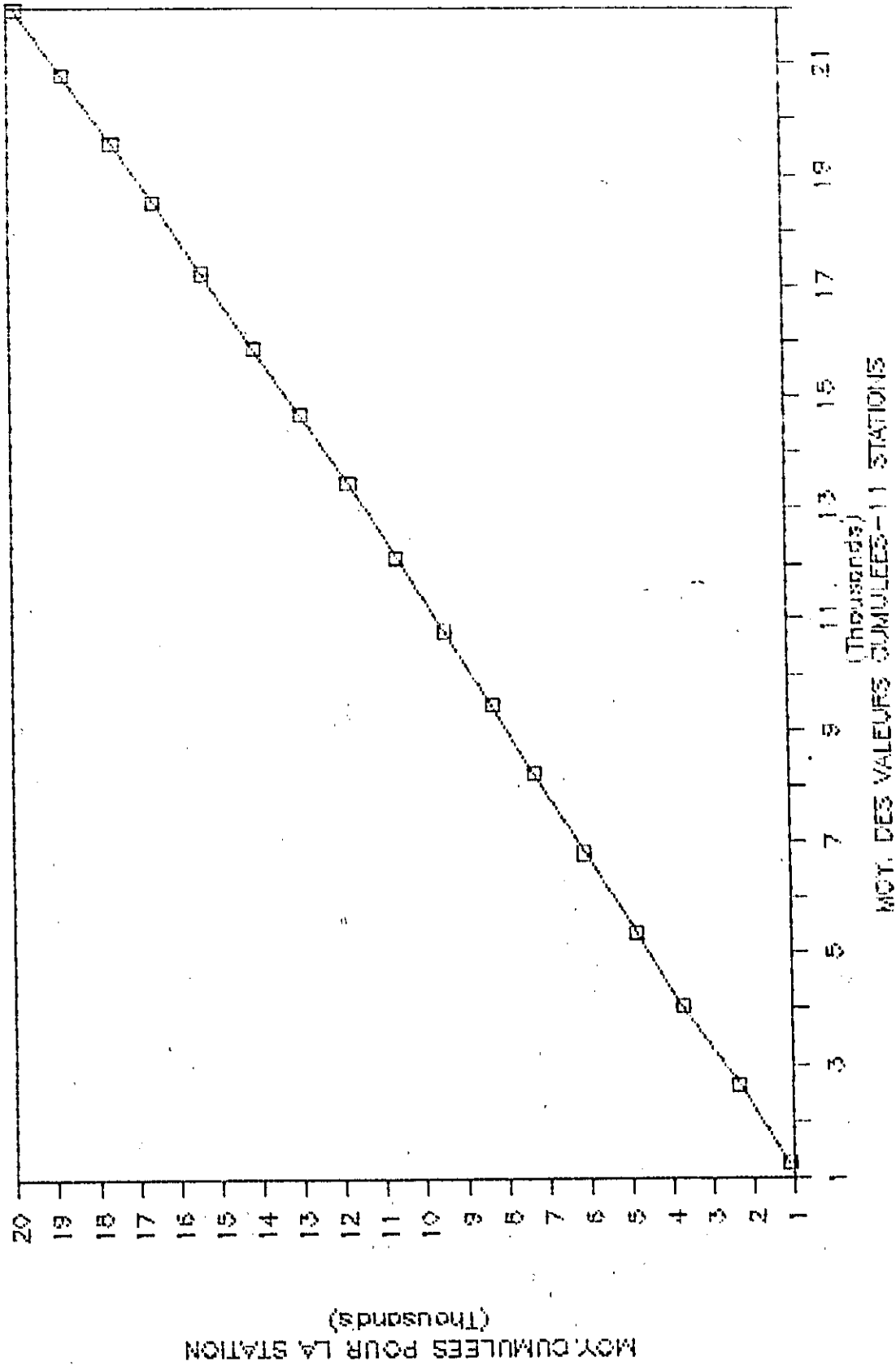
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

KILIGI



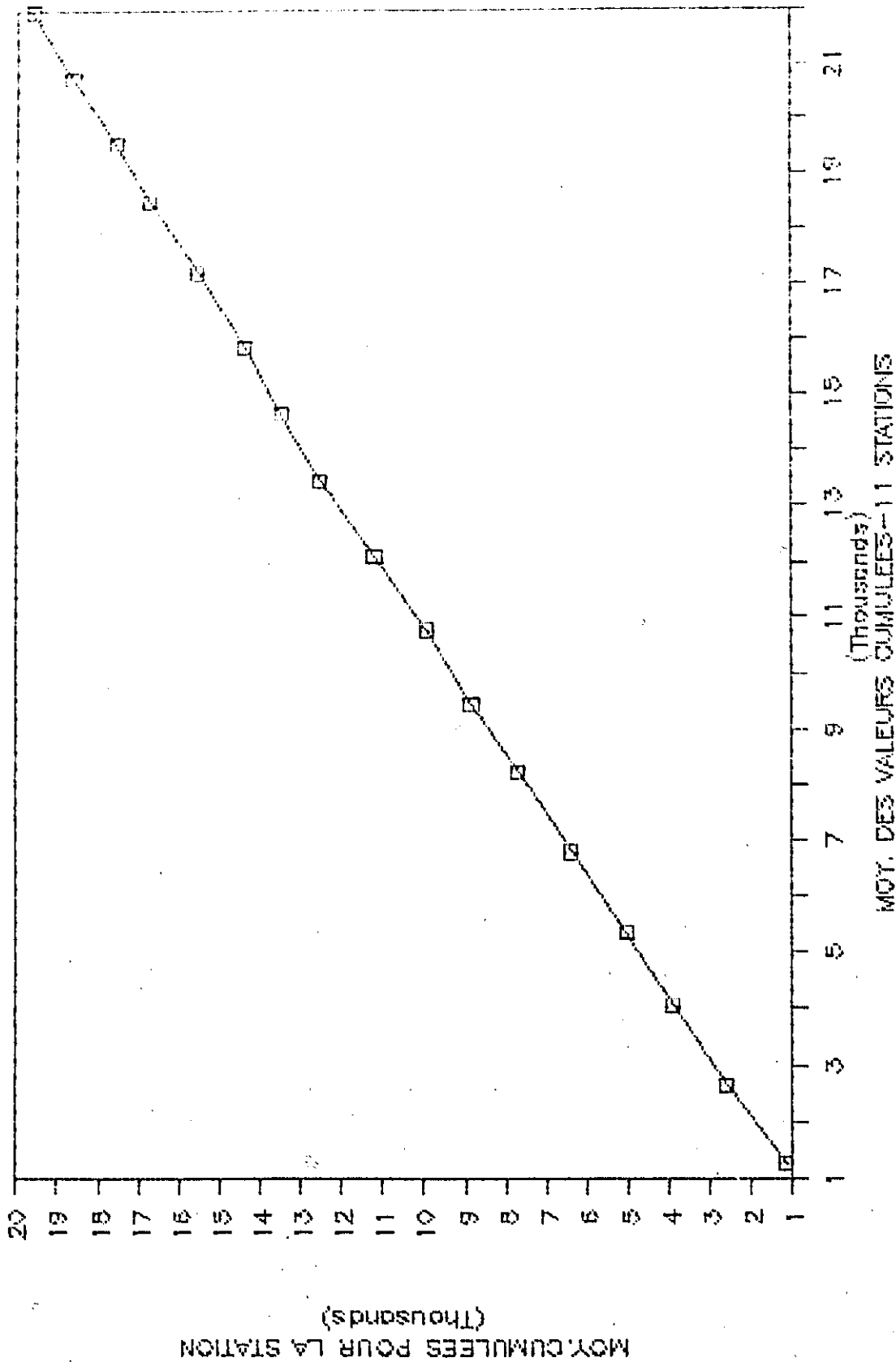
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

KINONI



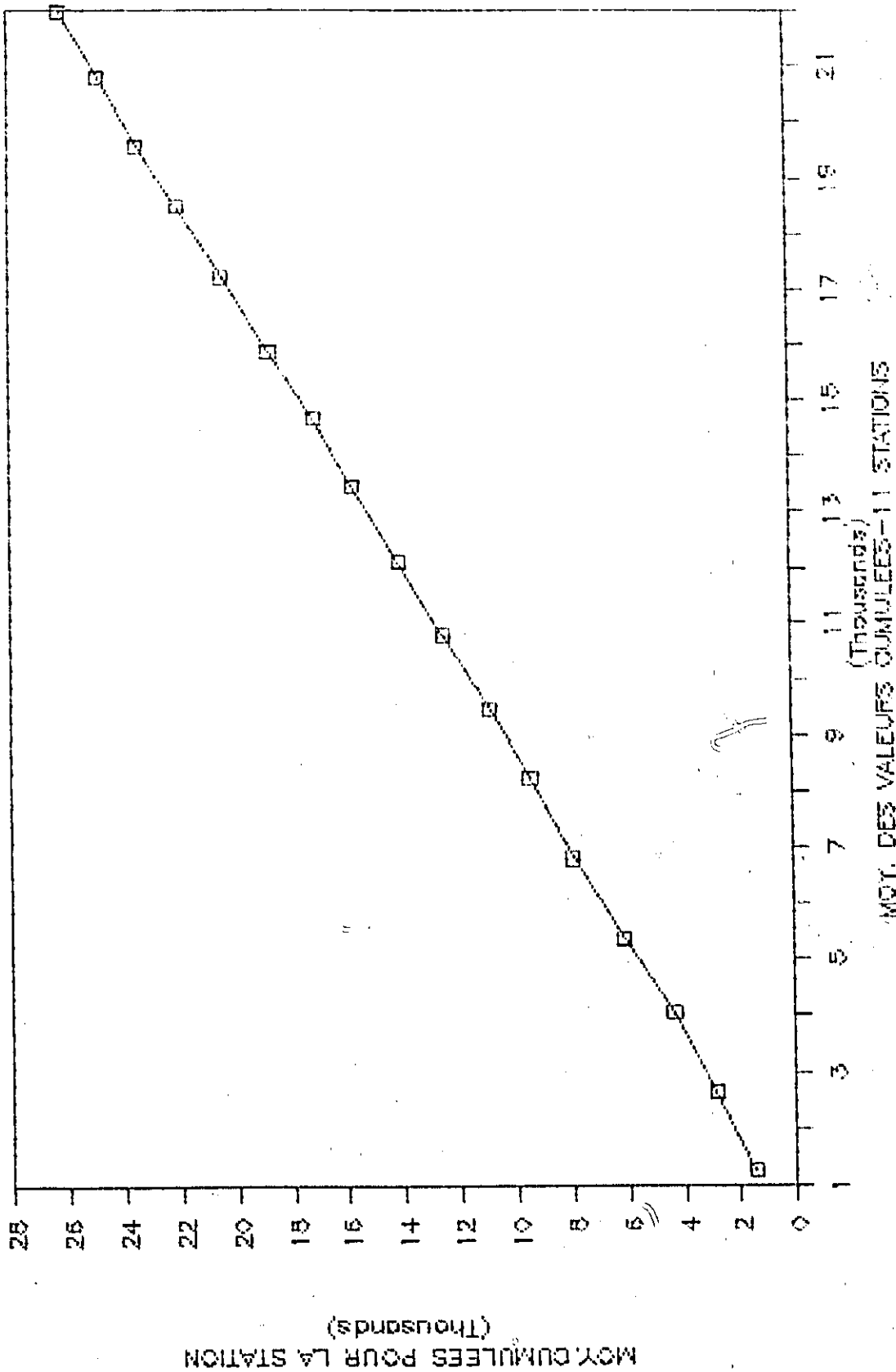
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

MURKINGO



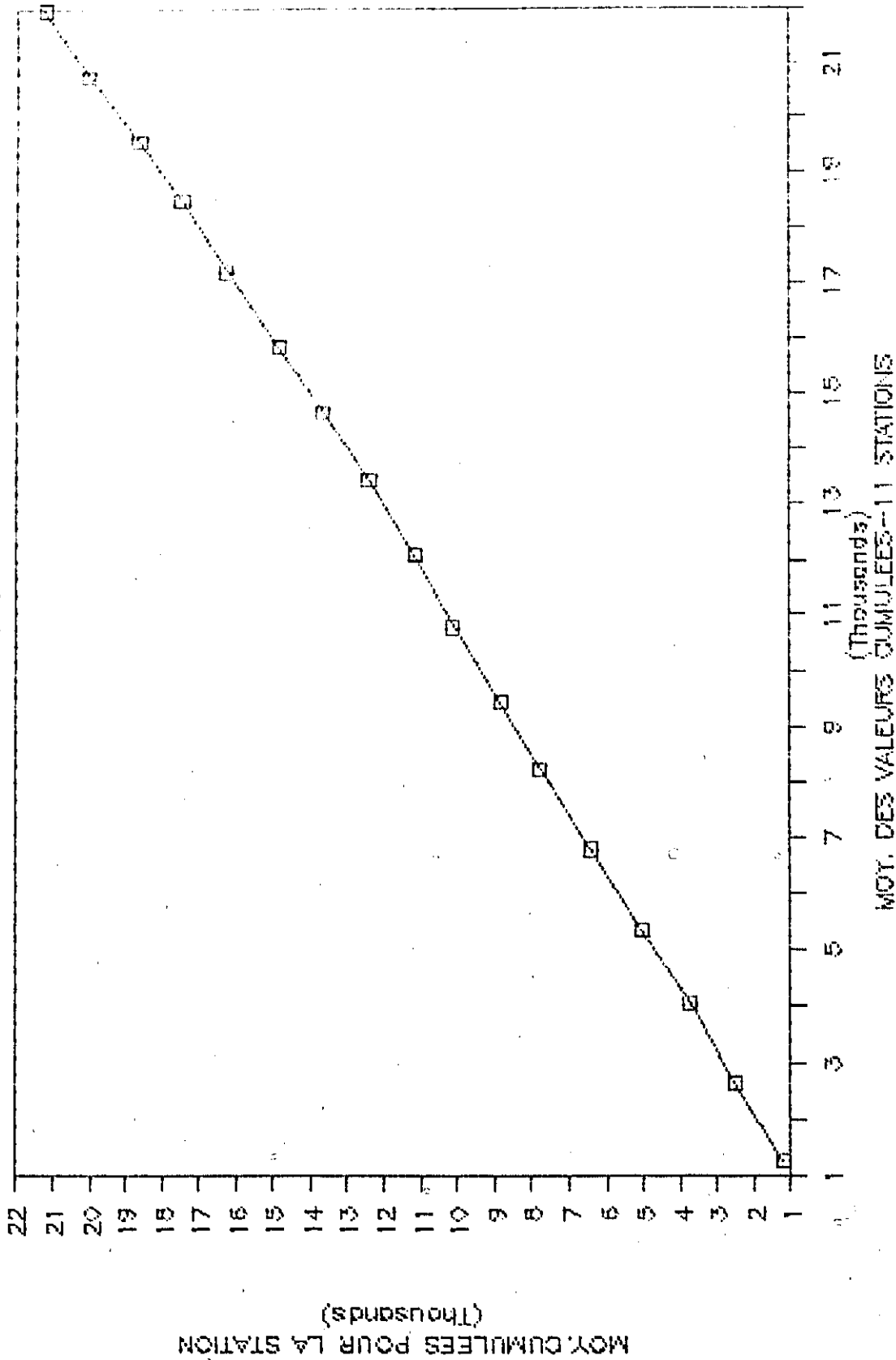
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

NEMBA



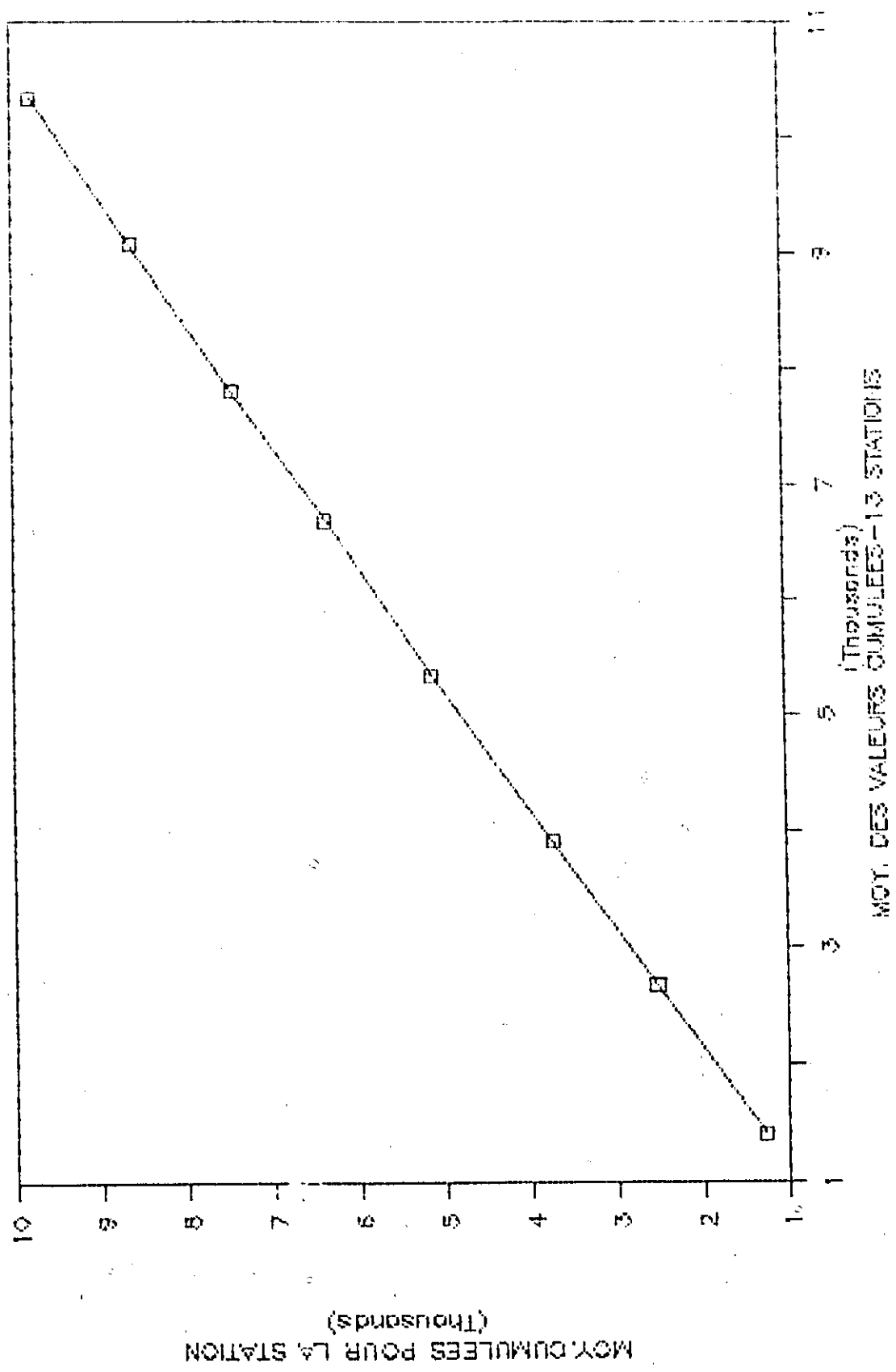
# ANALYSE DE MASSE 1970 © 1986

NTARUKA



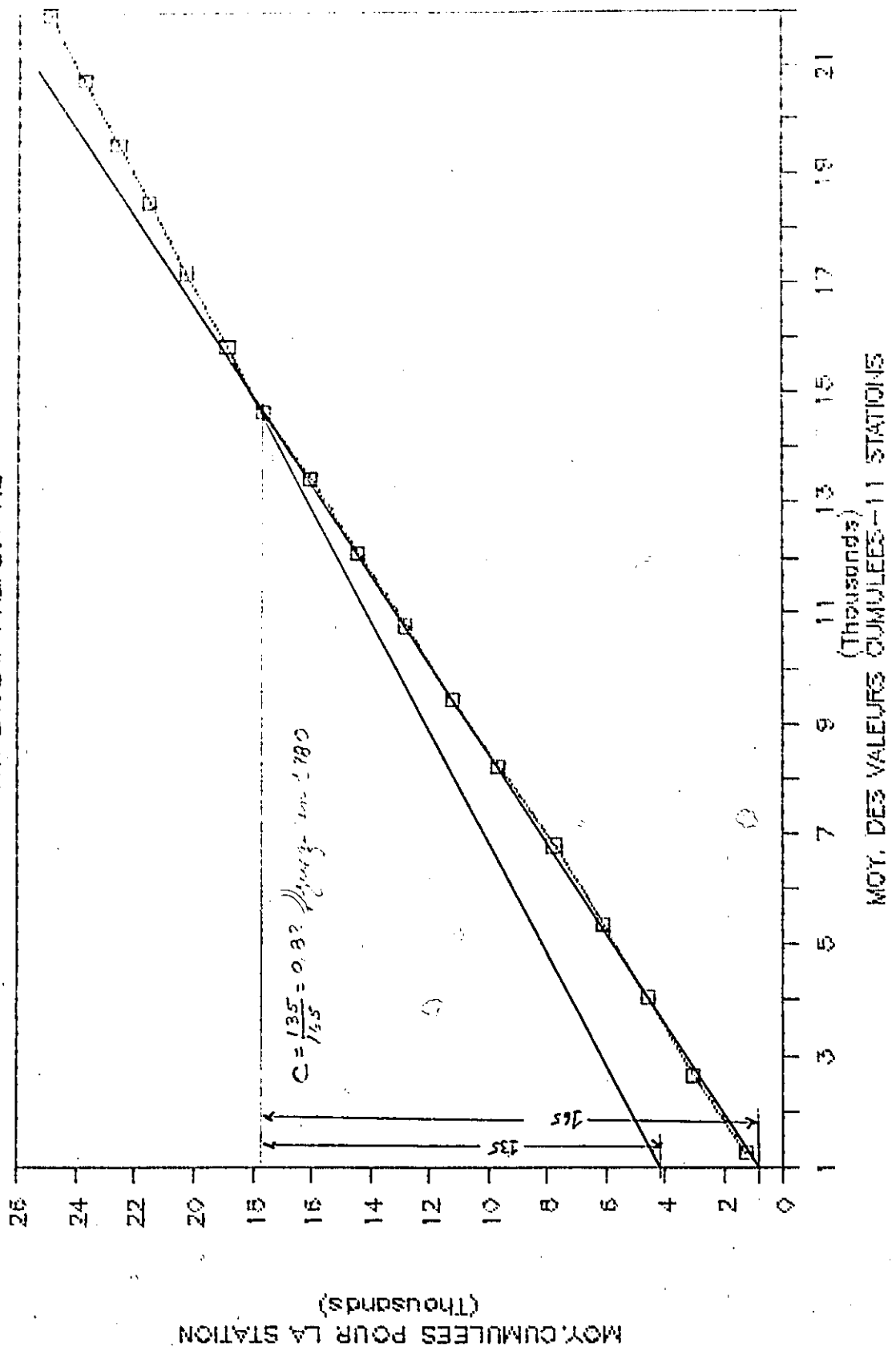
# ANALYSE DE MASSE 1979 © 1986

RUHENGERI-AERO



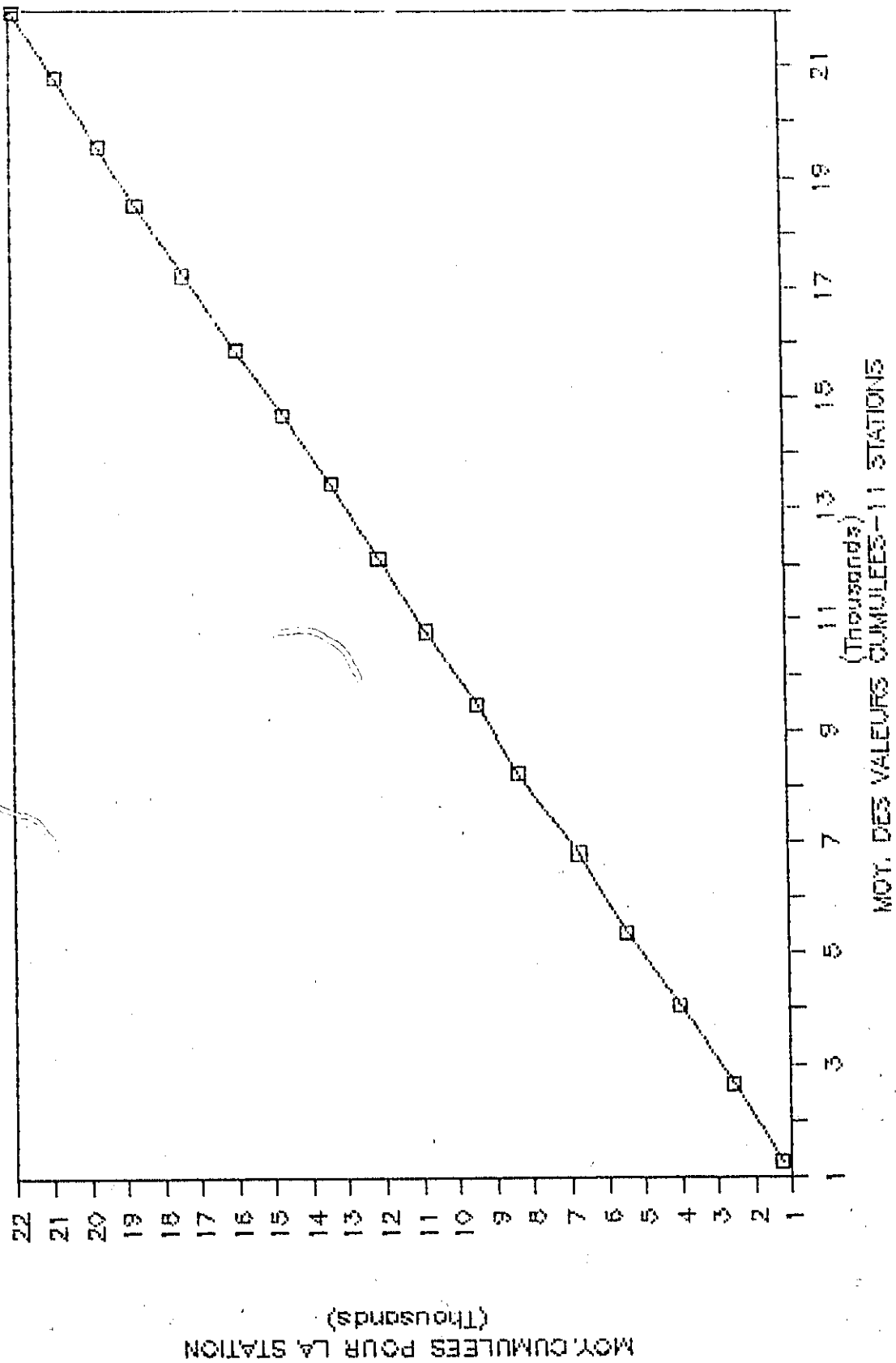
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

RUFENGERI - PREFECTURE



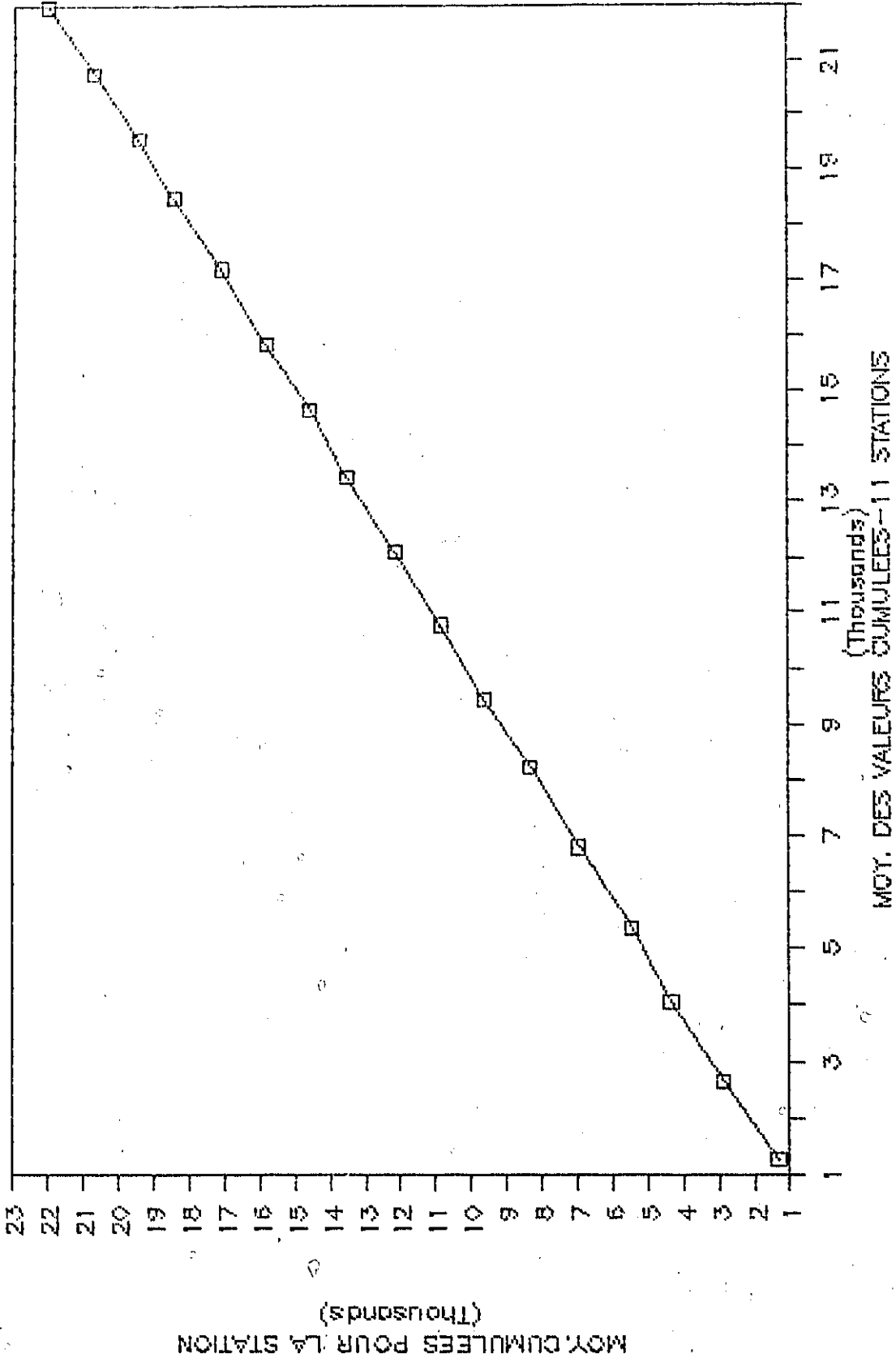
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

RUHUNDE



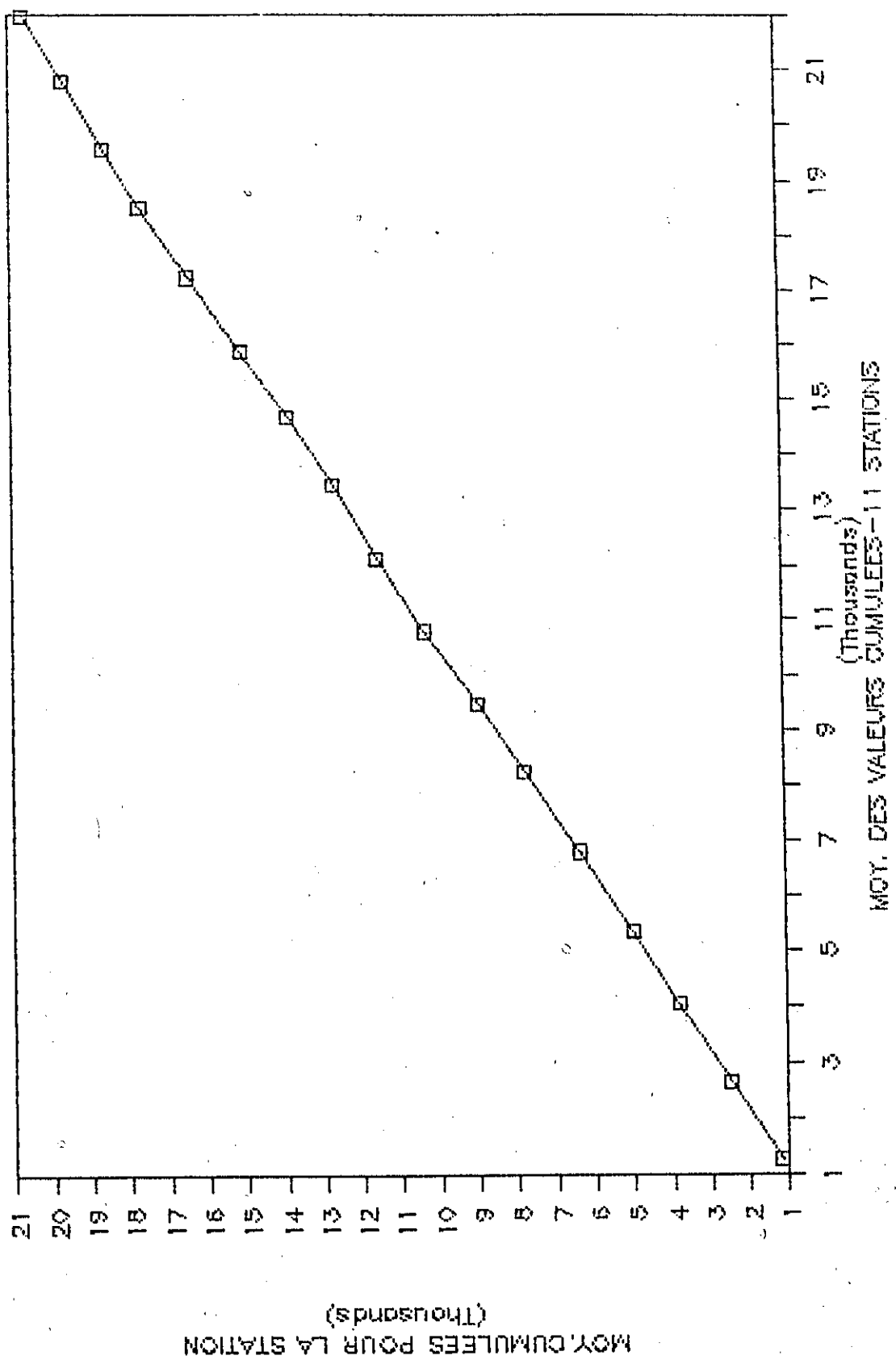
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

ROMANKERI



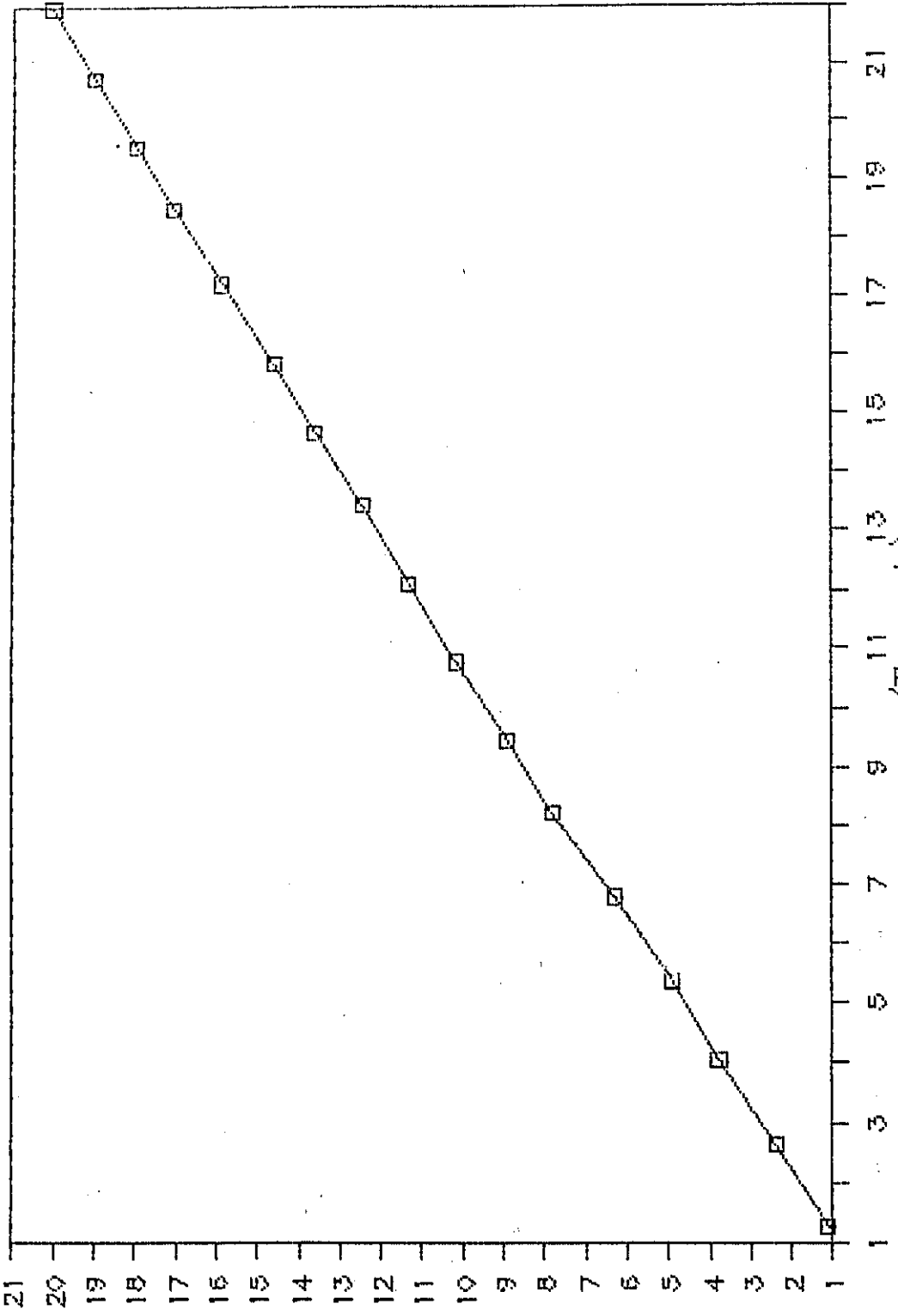
# ANALYSE DE MASSE 1970 @ 1986

FWERERE-COLLINE



# ANALYSE DE MASSE 1970 © 1986

RIVERE-MARAIS



MOY. CUMULEES POUR LA STATION  
(Thousands)

MOY. DES VALEURS CUMULEES - 11 STATIONS  
(Thousands)

**ANNEXE C**

**MESURES DE DEBITS**



JAUGEAGE DU: 21/10/1987

Rivière: Rusumo

Station: Rugizi

Observations: \_\_\_\_\_

Emplacement de la section: aval part

Moulinet: \_\_\_\_\_ Hélice n°: \_\_\_\_\_ Pas: \_\_\_\_\_

Formule de tarage: \_\_\_\_\_

Nature de la section: \_\_\_\_\_

Opérateur: \_\_\_\_\_

Largeur: 9m + 2,10 + 9m = 6,10m

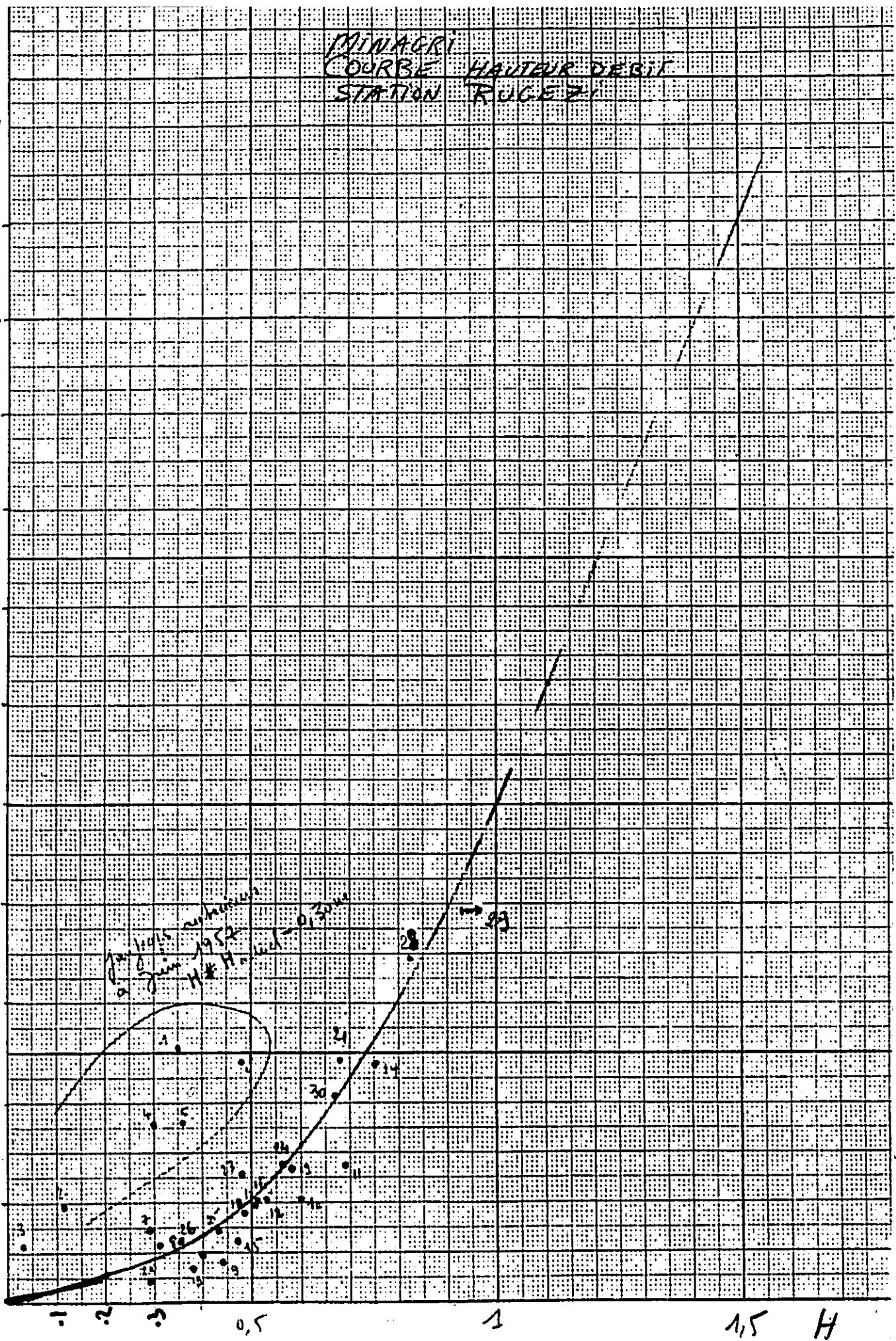
Hauteurs  
D 10,80 D 0,60  
F \_\_\_\_\_ F \_\_\_\_\_

Distances	Profs	Profs Moulinet	Angle cable	Profs corrigées	N/tours	T/sec.	N/T	V m/sec.	Observations
R.A.			1 <sup>er</sup>	Deuse					
0.40	0.50	0.25			81	30"	2.70	0.686	
0.60	0.50	0.26			103	30"	3.43	0.870	
0.80	0.53	0.29			112	30"	3.73	0.946	
1.00	0.55	0.28			146	30"	4.87	1.233	
1.20	0.59	0.30			128	30"	4.27	1.082	
1.40	0.53	0.26			54	30"	1.80	0.460	
1.60	0.53	0.26			29	30"	0.97	0.250	
1.80	0.48	0.21			25	30"	0.83	0.215	
R.6.0	0.20								
			2 <sup>e</sup>	Deuse					
R.A.									
0.20	0.38	0.19			30	30"	0.67	0.175	
0.40	0.49	0.25			101	30"	3.37	0.855	
0.60	0.55	0.28			149	30"	4.97	1.258	
0.80	0.52	0.26			142	30"	4.90	1.241	
1.00	0.54	0.27			151	30"	5.03	1.276	
1.20	0.55	0.28			108	30"	3.60	0.913	
1.40	0.58	0.29			105	30"	3.50	0.888	
1.60	0.59	0.30			54	30"	1.80	0.460	
1.80	0.53	0.26			21	30"	0.70	0.182	
R.6.0	0.10								
			3 <sup>e</sup>	Deuse					
R.A.									
0.20	0.39	0.20			141	30"	4.70	1.190	
0.40	0.40	0.20			162	30"	5.40	1.367	
0.60	0.37	0.18			80	30"	2.67	0.679	



Q  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1

MINAGRI  
COURBE HAUTEUR DEBIT  
STATION RUCESI



0.1 0.2 0.3 0.5 1 1.5 H

Q

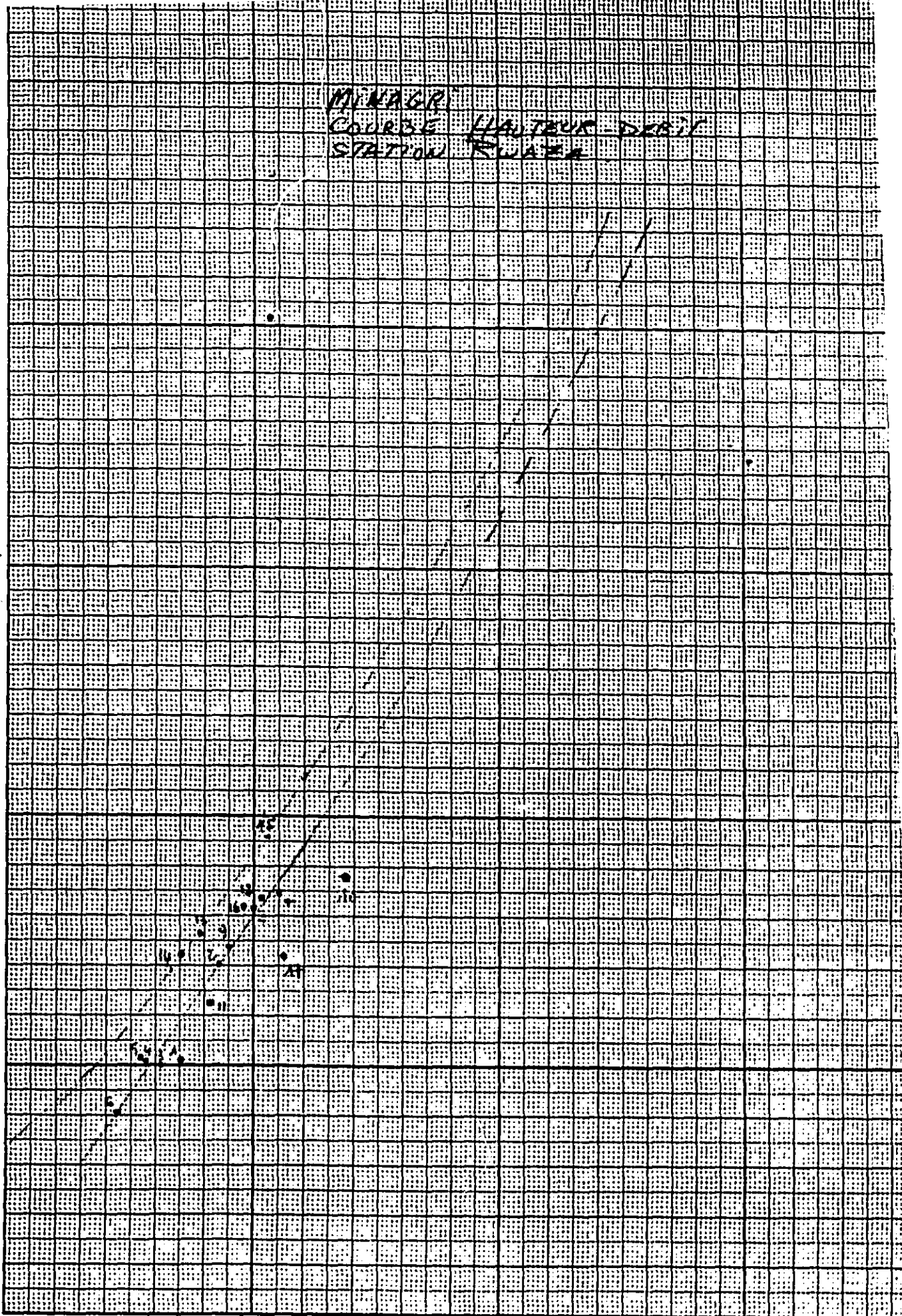
MANAGER  
COURSE LAURENT - DEBIL  
STATION RWAZA

20

5

10

5



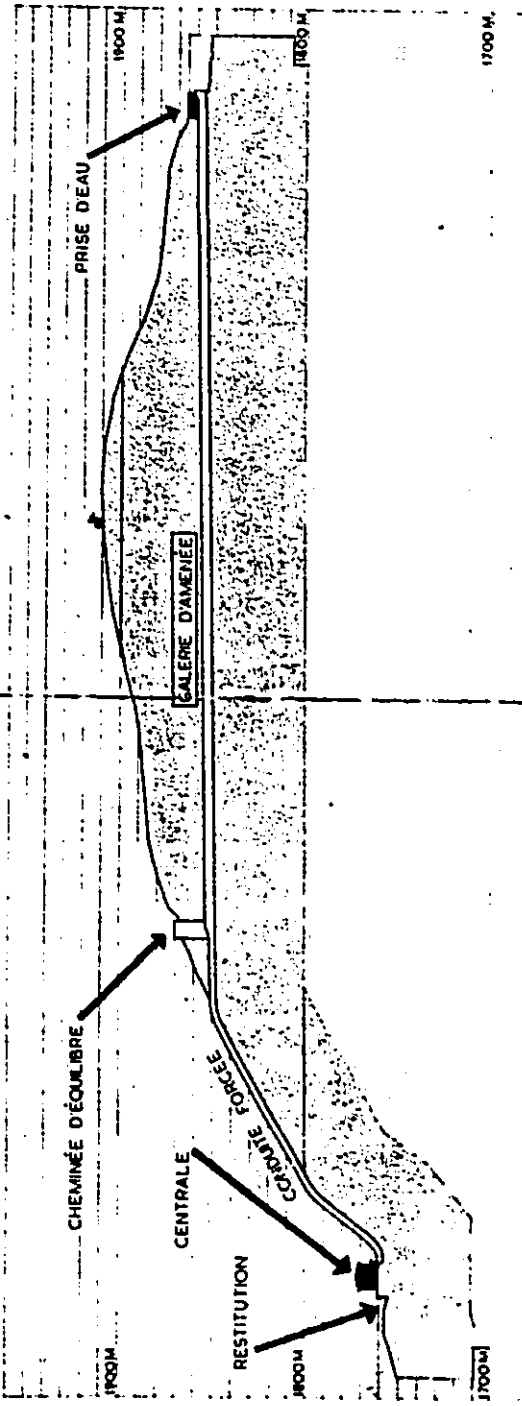
0,1 2,2 0,3 0,4 0,5

H

**ANNEXE D**

**CALCULS HYDRAULIQUES - CENTRALE DE NTARUKA**

# PROFIL EN LONG GENERAL



## CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'AMENAGEMENT

### 1. DONNEES HYDROLOGIQUES.

Bassin versant de la Taruka : 580 km<sup>2</sup> dont 47 km<sup>2</sup> de superficie du lac Bulera.  
(Altitude moyenne = 2.000 m).  
Débit moyen de la Taruka : 2,8 m<sup>3</sup>/sec.  
Débit max. estimé de la Taruka : 50 m<sup>3</sup>/sec.

### 2. CARACTERISTIQUES D'UTILISATION DES CHUTES DE LA TARUKA.

Côte maximum de retenue : 1.864,00  
Côte de restitution : 1.760,70  
Hauteur de chute max. brute : 103,30 m.  
Débit maximum turbinable : 13,5 m<sup>3</sup>/sec.  
Réserve du lac Bulera : 200 millions de m<sup>3</sup> entre les cotes 1859,70 et 1864,00, soit 45 millions kWh disponibles au delà de la productibilité moyenne de 20

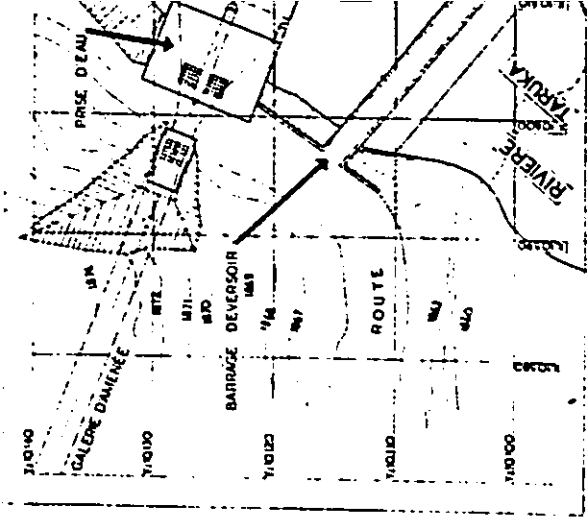
### 3. BARRAGE DEVERSOIR.

Hauteur maximum sur fondation : 3,50 m.  
Longueur totale : 25 m.  
Le barrage est surmonté d'une passerelle en béton armé pour piétons.

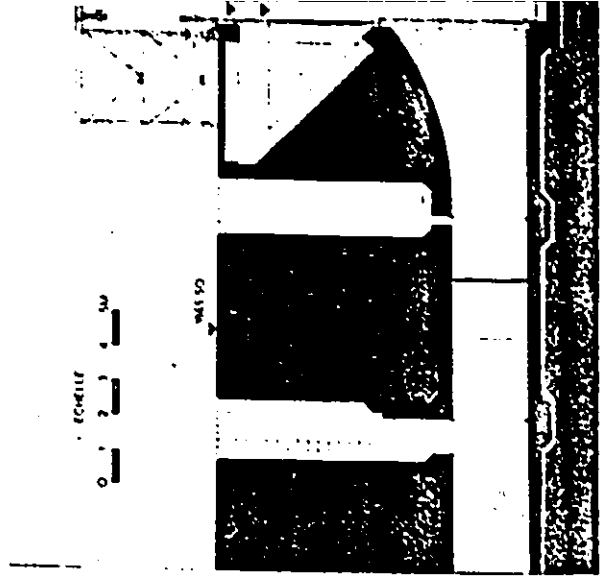
### 4. PRISE D'EAU.

Côte de seuil : 1856,50  
Deux pertuis : équipés chacun d'une grille de 4,30 m de haut et 4,00 m de large, et d'une vanne-batardeau r de 2,20 m de haut sur 1,40 m de large.

OUI

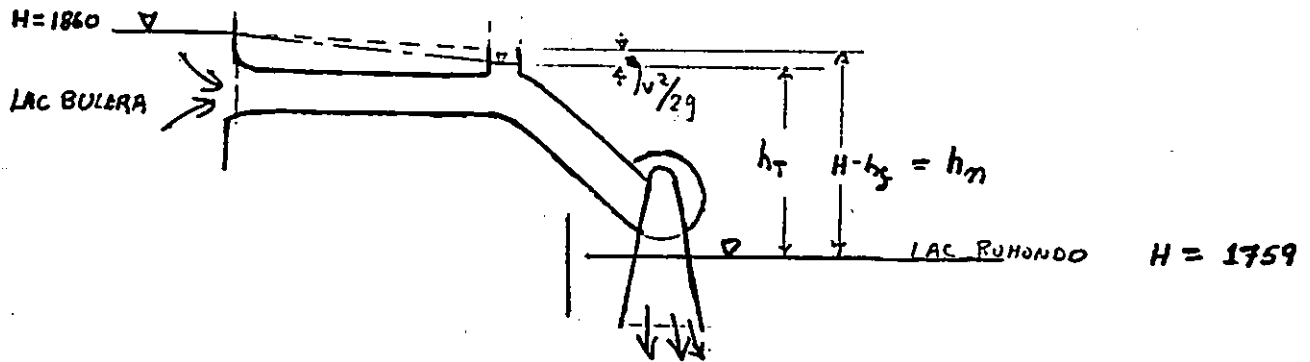


PRISE D'EAU (coupe)



## 1.0) Calcul des pertes de charges - Centrale de NTAVUKA

Référence : Creager E, JUSTIN "HYDRO-ELECTRIC HANDBOOK" 1950



### a) Pertes dans le canal d'aménée

Prise d'eau de type "h" avec bords arrondis

$C = 0,88$  pour angle d'étranglement de  $22^\circ$

$$h_{f1} = K_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\text{ou } K_1 = \frac{1}{C^2} - 1 = 0,29 = K_1$$

Grillage :

$$h_{f2} = K_2 \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\text{ou } K_2 = 0,74$$

a) Canal d'amenée : (suite)COURBURES :

- 2 coudes à  $45^\circ$  et  $R = 10 \text{ m}$

- selon figure 7 :

pour  $\frac{R}{d} = 4.4 \Rightarrow K_{90^\circ} = 0,25$

- selon figure 8 :

pour  $K_{45} \rightarrow K_{45} = 0,7 \times K_{90^\circ} = 0,18$

= donc  $h_{f_3} = K_3 \frac{V_1^2}{2g}$

$$\therefore K_3 = 2 \times 0,18 = 0,36$$

Vannes (selon Daugherty & Franzini)

$K_v = 0,19$  (vanne guillotine ouverte)

Pertes par friction

- conduite d'amenée :  $\phi = 2,25 \text{ m}$   
 $\hookrightarrow V_1$   $L = 424 \text{ m.}$   
 béton.

- D'après Hazen-Williams,

$$V = 0,85 \cdot C \cdot R_h^{0,63} \cdot S^{0,54}$$

a) Canal d'aménée : (suite)

$$\text{où } R_h = \phi/4$$

$$V = Q/A$$

$$Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Rightarrow S = \left( \frac{(Q/A)}{0,85 \cdot C \cdot (\phi/4)^{2,63}} \right)^{1/0,54}$$

$$= 7,99 \times 10^{-4} \text{ m/m.}$$

$$\therefore h_{s5} = 0,34 \text{ m.}$$

CONDUITE forcée :  $\phi = 1,8 \text{ m}$   
 $\rightarrow V_2$   $L = 195 \text{ m}$

$$\therefore S = 1,69 \times 10^{-3} \text{ m/m}$$

$$h_{s6} = 0,33 \text{ m.}$$

Partes par CONTRACTION : - conduite d'aménée  $\rightarrow$   
 conduite forcée.

$$\phi_2/\phi_1 = 0,8$$

$$\Rightarrow K_c = 0,17 = K_7$$

• VANNE GUILLOTINE - CONDUITE FORCEE

$$K_8 = 0,19$$

• 2 coude  $45^\circ \rightarrow K_9 = 0,36.$

b) Pertes de charges (excluant Turbine)

$$h_f = \left( k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \right) \frac{v_1^2}{2g} + h_{f5} + h_{f6} + \left( k_7 + k_8 + k_9 \right) \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\underline{\underline{h_f = 0,94 \text{ m pour } Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}.$$

c) Pertes dans les turbines:

• posons que 2 turbines fonctionnent avec  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  total.

• D'après le graphique 5

$$\frac{v^2}{2g} = 1,05 \text{ m} = \text{pertes dans les turbines.}$$

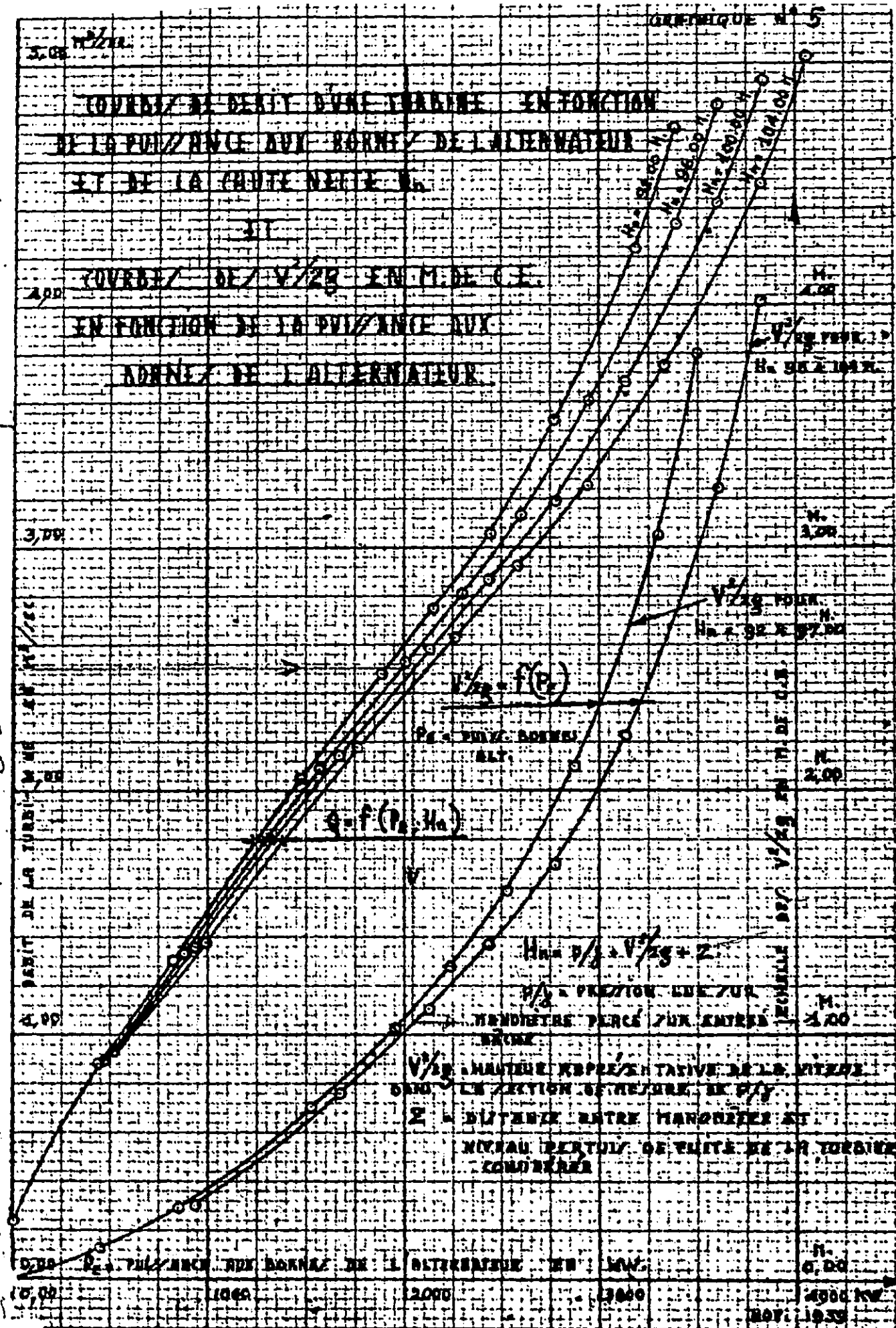
d) HAUTEUR DE CHUTE EFFECTIVE ( $h_{eff}$ )

$$h_{eff} = 101 - 0,94 - 1,05$$

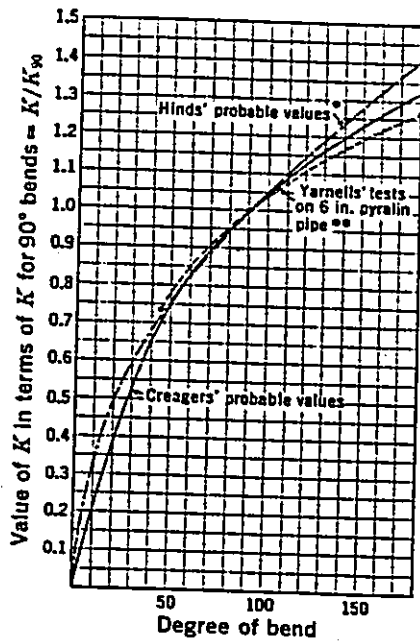
$$h_{eff} = 99 \text{ m} \quad \text{à NTARUKA} \\ \text{pour } Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

COEFFICIENT DE PERTE D'UNE TURBINE EN FONCTION  
DE LA PUISSANCE AUX BORNES DE L'ALTERNATEUR  
ET DE LA CHUTE NETTE  $H_n$

COEFFICIENT DE  $V/\sqrt{gH}$  EN F.F.C.E.  
EN FONCTION DE LA PUISSANCE AUX  
BORNES DE L'ALTERNATEUR



$V/\sqrt{gH}$  - HAUTEUR REPRESENTATIVE DE LA TURBINE  
DANS LA SECTION DE RESERVOIR, EN F.F.C.E.  
 $Z$  - DIFFERENCE ENTRE HAUTEURS ET  
NIVEAU D'ENTREE DE FLUIDE DE LA TURBINE  
COMPRENUE



\* See p. 1033 of Ref. 5 of Section 19.  
 \*\* See p. 1042 of Ref. 5 of Section 19.  
 Fig. 8. Value of K for various degree bends in terms of K for 90° bends.

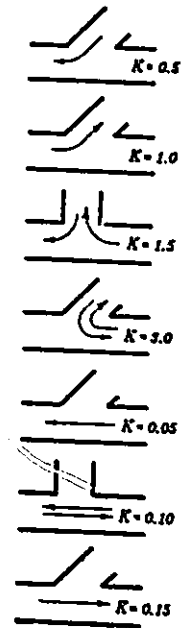


Fig. 9. Recommended safe values of K for miscellaneous fittings.

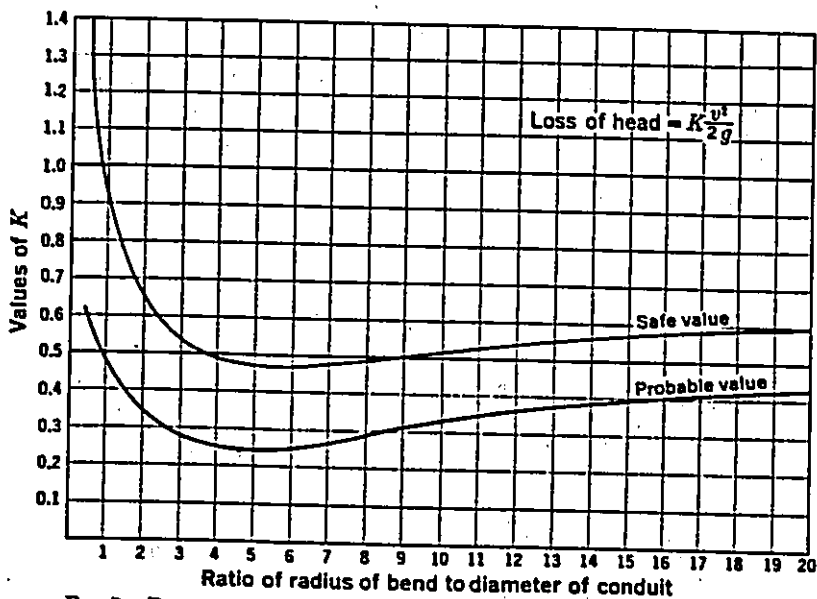


Fig. 7. Recommended values of K for 90° bends in closed conduits.

SOURCE: JUSTIN E. CREAGER.

2.0) CALCUL DU VOLUME TURBINE

partant de la relation d'énergie potentielle

$$E_p = w_e \cdot V \cdot h_e \cdot e \quad [\text{Kg} \cdot \text{m}]$$

où :

- $E_p$  = Energie potentielle en  $\text{kg} \cdot \text{m}$ .
- $w_e$  = poids de l'eau =  $9,81 \text{ KN/m}^3$
- $V$  = volume d'eau en  $\text{m}^3$
- $h_e$  = hauteur de chute effective en m
- $e$  = efficacité.

Nous obtenons que :

$$E_p = 2,7235 \times 10^{-3} V \cdot h_e \cdot e \quad \text{Kw} \cdot \text{h}$$

donc

$$V = \frac{E_p}{2,7235 \times 10^{-3} \cdot h_e \cdot e} \quad [\text{m}^3]$$

Calcul de l'efficacité :

à partir du graphique 5, pour  $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{he}$   
et  $h_m = 100$ , nous avons que

$$P = 2040 \text{ Kw}$$

$$\text{pour } T = 1 \text{ heure}$$

$$V = 2,5 \times 3600 = 9000 \text{ m}^3$$

$$\text{donc } e = \frac{2040}{2,7235 \times 10^{-3} \times 9000 \times 99} = 0,84$$

⇒ efficacité des turbines  $e = \underline{\underline{0,84}}$

⑨

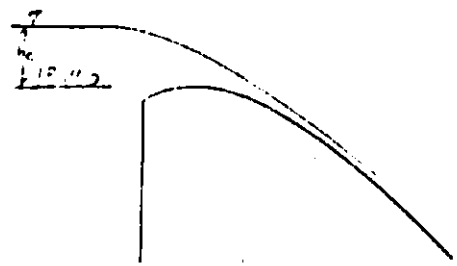
finalement:

$$V_{AN} = \frac{437,1 (E_{AN})}{h_{\text{effectif}}} \quad \text{et } h_{\text{effectif}} \approx 99$$

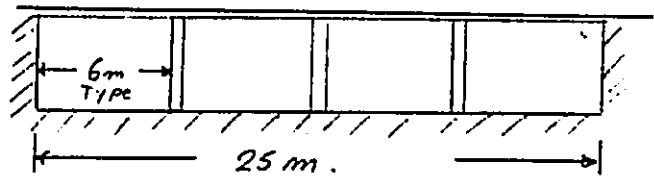
$$= \boxed{V_{AN} = 4,415 E_{AN}}$$

Barrage NTARUKA

3.0) Loi des déversements.



COUPE - TYPE.



SECTION LONGITUDINALE DU SEUIL.

$$Q = c \cdot l \cdot h_c^{3/2} \quad [3.1]$$

où Q = débit

c = coefficient d'écoulement

l = largeur effective

h = hauteur de charge sur le seuil

calcul de la largeur effective.

De l'éq. de Francis,  $l = 4 \times 6 \text{ m} - (h_c + h_v) (K_a n_a + K_b n_b)$

$$l = 24 - (h_c + h_v) (2 \times 0,1 + 6 \times 0,4)$$

$$l = 24 - 2,6 (h_c + h_v)$$

Assumons que  $h_v$  est négligeable par à  $h_c$  (Reservoir à grand écoulement)

$$\Rightarrow \boxed{l = 24 - 2,6 (h_c)}$$

Détermination de c

Barrage de type 1a : barrage rectiligne, vitesse d'approche négligeable.

$$Q_{max} = 50 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$h_{max} = 1,0 \text{ m} = h'_c \text{ la hauteur de conception, on}$$

trouve à la figure 15 de Justini, Creager présentée à la page suivante que  $c = 3,78$  pour l'équation en unités anglaises

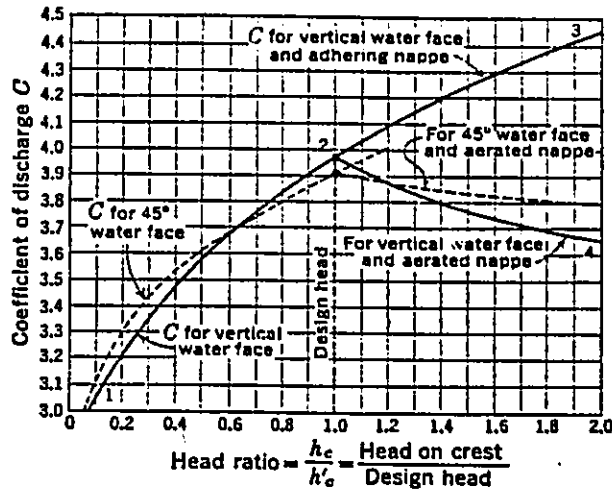


FIG. 15. Coefficients of discharge for straight standard dam crests with no velocity of approach. PP122, Justin, Crayer

en reprenant la courbe de la figure 15 et en posant que  $h'_c = 1,0m$ , nous pouvons représenter cette courbe par la relation suivante:

$$C_A = 3,925 \cdot h_c^{0,119554} \quad [\text{système anglais}]$$

Pour ramener au système international nous savons

que le coefficient de déversoir  $C = C_d \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g}$  (référence Deminghans pp 402)

où  $C_d$  = coefficient de déversement indépendant du système d'unités, donc.

$$C_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{C_A}{\sqrt{2g_A}} = \frac{3}{2} \frac{C_{SI}}{\sqrt{2g_{SI}}}$$

$$\Rightarrow C_{SI} = \sqrt{\frac{9 \cdot 81}{32,2}} \times C_A$$

Finalement  $C_{SI} = 2,1664 \cdot h_c^{0,119554}$  SI

$$\text{et } Q_{moyen} = C_{SI} \cdot l \cdot h_{c \text{ moyen}}^{3/2}$$

**ANNEXE E**

**OCCUPATION DES SOLS - SOUS-BASSIN RUGEZI**  
**(Source: MINAGRI, direction générale du forêts)**

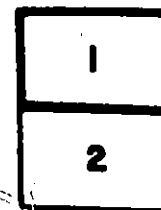
CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA				
Commune	BUTARO	Prefecture	RUHENGARI	No Commune : 14
Categorie d'occupation	Type de culture	Code	Surfaces (ha)	
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	688.80
	Savane boisee	SB	0.00	
	Savane arbustive	SA	7.75	
	Savane herbeuse	SH	0.00	
	Marais a papyrus et ph.	M	681.05	
	Prairie en foret natur.	PF	0.00	
Reboisement	Reboisement	--	571.27	571.27
Cultures perennes	Bananiers	B	387.19	389.63
	Cafeiers	---	2.44	
	Theiers	T	0.00	
	Quinquina	Q	0.00	
	Pyrethre	P	0.00	
	Canne a sucre	CS	0.00	
	Fruitiers	F	0.00	
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	2382.72	9642.80
	Avec jacheres >10%<30%	J2	7093.23	
	Avec jacheres >30%<50%	J3	166.85	
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00	1059.77
	Cult. ann. autre que le riz	CA	1040.26	
	Non occupe ou en jacher.	NO	19.52	
Paturage	Zones de paturage (*)	PN	111.06	111.06
	Paturage ameliore	PA	0.00	
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	--	0.00	0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	---	28.79	28.79
Zones non exploitables	Forte pente	FP	0.00	0.96
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00	
	Rochers ou bancs later.	RL	0.96	
	Drainage	D	0.00	
Surface totale (ha) = 12493.10				
(*) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)				

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA

Commune		CYERU   Prefecture : RUHENGARI		No Commune : 20	
Categorie d'occupation	Type de culture	Code	Surfaces (ha)		
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00		
	Savane boisee	SB	0.00		
	Savane arbustive	SA	0.00		
	Savane herbeuse	SH	0.00		
	* Marais a papyrus et ph.	M	1451.08		
	Prairie en foret natur.	PF	0.00		1451.88
Reboisement	Reboisement	--	871.08		871.08
Cultures perennes	Bananiers	B	1252.18		
	Cafeiers	--	1.23		
	Theiers	T	0.00		
	Quinquina	Q	0.00		
	Pyrethre	P	0.00		
	Canne a sucre	CS	0.00		
	Fruitiers	F	0.00		1253.40
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	5093.37		
	Avec jacheres >10%<30%	J2	5549.05		
	Avec jacheres >30%<50%	J3	0.00		11442.42
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.56		<u>RUGEZI</u>
	Cult. ann. autre que le riz	CA	778.08		509
	Non occupe ou en jacher.	NO	33.80		812.44
Paturage	Zones de paturage (x)	PN	124.03		
	Paturage amélioré	PA	0.00		124.03
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	--	0.00		0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	--	114.45		114.45
Zones non exploitables	Forte pente	FP	10.29		
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00		
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00		
	Drainage	D	0.00		10.29
			Surface totale (ha) = 16079.99		
(x) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%.)					

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA						
Commune :		CYERU 1	Prefecture :	RUMENGERI	No Commune :	20
Categorie d'occupation	Type de culture	(Code)	Surfaces (ha)			
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	1142.96		
	Savane boisee	SB	0.00			
	Savane arbustive	SA	0.00			
	Savane herbeuse	SH	0.00			
	Maraie a papyrus et ph.	M	1142.96			
	Prairie en foret natur.	PF	0.00			
Reboisement	Reboisement	—	478.32	478.32		
Cultures perennes	Bananiers	B	512.75	512.81		
	Cafeiers	—	0.06			
	Theiers	T	0.00			
	Quinquina	Q	0.00			
	Pyrethre	P	0.00			
	Canne a sucre	CS	0.00			
	Fruitiers	F	0.00			
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	2142.75	6225.79		
	Avec jacheres >10%(<30%	J2	4083.04			
	Avec jacheres >30%(<50%	J3	0.00			
Vallees et bas fonds aménages	Riz	R	0.56	583.08		
	Cult.ann.autre que le riz	CA	582.52			
	Non occupe ou en jacher.	NO	0.00			
Paturage	Zones de paturage (*)	PN	55.56	55.56		
	Paturage ameliore	PA	0.00			
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	—	0.00	0.00		
Zones d'habitation	Zones d'habitation	—	5.38	5.38		
Zones non exploitables	Forte pente	FP	4.28	4.28		
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00			
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00			
Surface totale (ha) = 9010.19						
(*) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)						

BUTARO



CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA

Comune : CYERU 2   Prefecture : RUKONGORI   No Commune : 20				
Categorie d'occupation	Type de culture	(Code)	Surfaces (ha)	
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	
	Savane boisee	SB	0.00	
	Savane arbustive	SA	0.00	
	Savane herbeuse	SH	0.00	
	Marais a papyrus et ph.	M	308.92	
	Prairie en foret natur.	PF	0.00	308.92
Reboisement	Reboisement	--	392.76	392.76
Cultures perennes	Bananiers	B	739.43	
	Cafeiers	--	1.16	
	Theiers	T	0.00	
	Quinquina	Q	0.00	
	Pyrethre	P	0.00	
	Canne a sucre	CS	0.00	
	Fruitiers	F	0.00	740.59
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres (<10Z	J1	3750.62	
	Avec jacheres >10Z(<30Z	J2	1466.01	
	Avec jacheres >30Z(>50Z	J3	0.00	5216.64
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00	
	Cult.ann. autre que le riz	CA	195.56	
	Non occupe ou en jacher.	NO	33.80	229.36
Paturage	Zones de paturage (N)	PN	68.47	
	Paturage ameliore	PA	0.00	68.47
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	--	0.00	0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	--	109.07	109.07
Zones non exploitables	Forte pente	FP	4.00	
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00	
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00	
				4.00
Surface totale (ha)			= 7069.81	
(N) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50Z)				

SOUS

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA			
Commune : NYAMUGALI   Prefecture : RUKONGORI   No Commune : 21			
Categorie d'occupation	Type de culture	Code	Surfaces (ha)
Vegetation naturelle	Forêt naturelle	FN	0.00
	Savane boisée	SB	0.00
	Savane arbustive	SA	2.31
	Savane herbeuse	SH	0.00
	Marais à papyrus et ph.	M	948.86
	Prairie en forêt natur.	PF	0.00
			948.17
Reboisement	Reboisement	—	810.00
			810.00
Cultures perennes	Bananiers	B	836.73
	Caféiers	—	0.00
	Theiers	T	92.94
	Quinquina	Q	0.00
	Pyrethre	P	0.00
	Canne à sucre	CS	0.00
	Fruitières	F	0.00
			949.69
Cultures annuelles et saisonnières	Avec jachères (<10%	J1	4914.71
	Avec jachères >10%(<30%	J2	3904.46
	Avec jachères >30%(>50%	J3	55.56
			8874.73
Vallées et bas fonds aménagés	Riz	R	0.00
	Cult. ann. autre que le riz	CA	649.54
	Non occupé ou en jacher.	NO	28.74
			678.28
Paturage	Zones de paturage (*)	PN	32.36
	Paturage amélioré	PA	0.00
			32.36
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	—	0.00
			0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	—	7.93
			7.93
Zones non exploitables	Forte pente	FP	0.00
	Phénomènes d'érosion	PE	4.28
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00
Surface totale (ha) = 12325.44			
(*) Zones de paturage naturel ou de jachères de longue durée (>50%)			

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA				
Commune : CYUNGO		Prefecture : BYUMBA		No Commune : 34
Categorie d'occupation	Type de culture	(Code)	Surfaces (ha)	
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	
	Savane boisee	SB	0.00	
	Savane arbustive	SA	0.00	
	Savane herbeuse	SH	0.00	
	Marais a papyrus et ph.	M	1121.84	
	Prairie en foret natur.	PF	0.00	1121.84
Reboisement	Reboisement	—	747.33	747.33
Cultures perennes	Bananiers	B	886.71	
	Cafeiers	—	5.29	
	Theiers	T	483.32	
	Quinquina	Q	0.00	
	Pyrethre	P	0.00	
	Canne a sucre	CS	0.00	
	Fruitiers	F	0.00	1375.32
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres (<10%	J1	5352.59	
	Avec jacheres >10%(<30%	J2	933.69	
	Avec jacheres >30%(<50%	J3	6.57	6292.85
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00	
	Cult.ann. autre que le riz	CA	479.52	
	Non occupe ou en jacher.	NO	5.94	485.46
Paturage	Zones de paturage (*)	PN	96.37	
	Paturage ameliore	PA	2.33	98.71
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	—	0.00	0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	—	30.05	30.05
Zones non exploitables	Fortes pente	FP	0.00	
	Phenomenes d'erosion	FE	0.00	
	Rochers ou bancs later.	RL	2.76	
				2.76
			Surface totale (ha) = 10154.32	
(*) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)				

RUGEZI  
340

Hondo  
781

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA						
Commune :		KIBALI	Prefecture :	BYUMBA	No Commune :	35
Categorie d'occupation	Type de culture	Code	Surfaces (ha)			
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00			
	Savane boisee	SB	0.00			
	Savane arbustive	SA	6.90			
	Savane herbeuse	SH	0.00			
	Marais a papyrus et ph.	M	120.31			HOUDO
	Prairie en foret natur.	PF	0.00			127.21
Reboisement	Reboisement	--	930.74			930.74
Cultures perennes	Bananiers	B	781.02			
	Cafiers	--	0.00			
	Theiers	T	307.06			
	Quinquina	Q	0.00			
	Pyrethre	P	0.00			
	Canne a sucre	CS	0.00			
	Fruitiers	F	0.00			1088.08
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	8064.23			
	Avec jacheres >10% <30%	J2	625.77			
	Avec jacheres >30% <50%	J3	56.81			8748.81
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00			
	Cult.ann.autre que le riz	CA	741.78			HOUDO
	Non occupe ou en jacher.	NO	28.12			769.90
Paturage	Zones de paturage (a)	PN	197.84			
	Paturage ameliore	PA	7.80			205.64
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	--	0.00			0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	--	58.60			58.60
Zones non exploitables	Fortes pente	FP	7.29			
	Phenomenes d'erosion	PE	1.14			
	Rochers ou bancs later.	RL	1.01			
						9.44
			Surface totale (ha) = 11938.42			
(a) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)						

CY

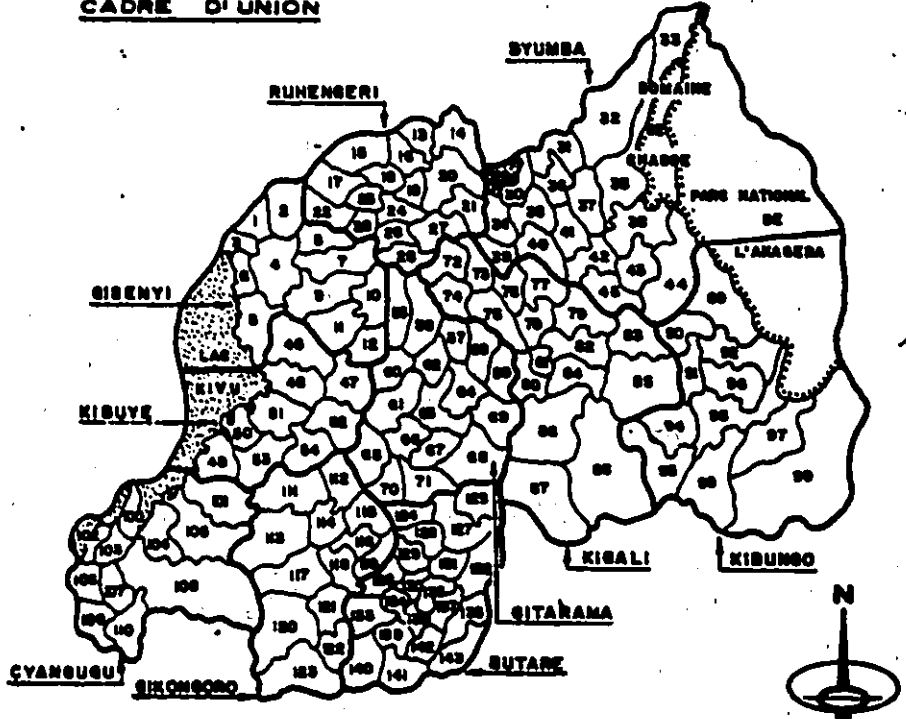
CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA				
Commune : KIVUYE   Prefecture : BYUMBA		No Commune : 29		
Categorie d'occupation	Type de culture	Code	Surfaces (ha)	
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	RUCEZI 332 1021.41
	Savane boisée	SB	0.00	
	Savane arbustive	SA	0.00	
	Savane herbeuse	SH	0.00	
	Marais a papyrus et ph.	M	1021.41	
	Prairie en foret natur.	PF	0.00	1021.41
Reboisement	Reboisement	—	431.30	431.30
Cultures perennes	Bananiers	B	23.25	
	Cafeiers	—	0.00	
	Theiers	T	0.00	
	Quinquina	Q	0.00	
	Pyrethre	P	0.00	
	Canne a sucre	CS	0.00	
	Fruitiers	F	0.00	
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	2735.46	
	Avec jacheres >10%<30%	J2	2787.02	
	Avec jacheres >30%<50%	J3	0.00	
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00	RUCEZI 74 133.88
	Cult. ann. autre que le riz	CA	133.88	
	Non occupe ou en jacher.	NO	0.00	
Paturage	Zones de paturage (*)	PN	54.37	
	Paturage ameliore	PA	0.00	
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	—	0.00	0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	—	116.64	116.64
Zones non exploitables	Forse pente	FP	0.00	
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00	
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00	
Surface totale (ha) = 7303.33				
(*) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)				

HONDO  
689

HONDO  
60

- 90 -- MUKAZI
- 91 -- RUTONZE
- 92 -- RAYONZA
- 93 -- GARE
- 94 -- MUCSERA
- 95 -- KIRARANA
- 96 -- KASARONDO
- 97 -- RUKIRA
- 98 -- BIRENGA
- 99 -- RUSUNO
- CYANGUBU**
- 100 -- CAPUNDO
- 101 -- GATARE
- 102 -- KAMENGE
- 103 -- GIDUMA
- 104 -- KASANO
- 105 -- KIRANGO
- 106 -- GYIMOSO
- 107 -- NYAKABUYE
- 108 -- KARENDEKA
- 109 -- GISHOMA
- 110 -- GUSARANA
- GIKONGORO**
- 111 -- MURU
- 112 -- MURANGA
- 113 -- MURUBEYA
- 114 -- KARANGA
- 115 -- RUKONDO
- 116 -- KARANA
- 117 -- MUBASOMWA
- 118 -- NYAMAGABE
- 119 -- RIBYANAKARA
- 120 -- KIVU
- 121 -- RWAMIRO
- 122 -- MUBUGA
- 123 -- KUNILI
- RUTARE**
- 124 -- NYAGIGINBU
- 125 -- MUYIRA
- 126 -- RUBATIRA
- 127 -- NYAZO
- 128 -- MARABA
- 129 -- RUMASHYA
- 130 -- MGAZI
- 131 -- MUGUSA
- 132 -- MUYUSA
- 133 -- RUVINYA
- 134 -- NYVE
- 135 -- NGOMA
- 136 -- NYANDA
- 137 -- NGORA
- 138 -- MUBANZA
- 139 -- GISHAMBU
- 140 -- NYAKIZU
- 141 -- KIGENGE
- 142 -- NYAMENGERI
- 143 -- KIGAYI

**CADRE D'UNION**



0 10 (km)

CARTE D'OCCUPATION DES SOLS - RWANDA				
Commune :	CYUMBA	Prefecture :	BYUMBA	No Commune : 30
Categorie d'occupation	Type de culture	(Code)	Surfaces (ha)	
Vegetation naturelle	Foret naturelle	FN	0.00	HONDO 311.58
	Savane boisee	SB	0.00	
	Savane arbustive	SA	0.00	
	Savane herbeuse	SH	0.00	
	Marais a papyrus et ph.	M	311.58	
	Prairie en foret natur.	PF	0.00	
Reboisement	Reboisement	—	459.05	459.05
Cultures perennes	Bananiers	B	53.84	350.29
	Cafeiers	—	0.00	
	Theiers	T	296.45	
	Quinquina	Q	0.00	
	Pyrethre	P	0.00	
	Canne a sucre	CS	0.00	
	Fruitiers	F	0.00	
Cultures annuelles et saisonnieres	Avec jacheres <10%	J1	5340.38	6014.80
	Avec jacheres >10%(<30%)	J2	647.11	
	Avec jacheres >30%(>50%)	J3	27.30	
Vallees et bas fonds amenes	Riz	R	0.00	HONDO 246.45
	Cult.ann.autre que le riz	CA	192.43	
	Non occupe ou en jacher.	NO	54.02	
Paturage	Zones de paturage (N)	PN	13.46	13.46
	Paturage ameliore	PA	0.00	
Etangs piscicoles	Etangs piscicoles	—	0.00	0.00
Zones d'habitation	Zones d'habitation	—	128.12	128.12
Zones non exploitables	Forte pente	FP	2.04	2.04
	Phenomenes d'erosion	PE	0.00	
	Rochers ou bancs later.	RL	0.00	
			Surface totale (ha) = 7525.79	
(N) Zones de paturage naturel ou de jacheres de longue duree (>50%)				

CALCUL DES SUPERFICIES CULTIVEES ET NON CULTIVEES DES MARAIS  
SE DRAINANT VERS RUGEZI EXCLUANT HONDO

-----  
SOURCE: CARTES D'OCCUPATION DES SOLS ET PLANIMETRAGE  
SUPERFICIE ha.  
-----

COMMUNE	MARAIS NAT.	MARAIS AMENAGES
BUTARO	681	1040
CYERU	1452	509
NYAMUGALI	966	0
CYUNGO	341	0
KIBALI	0	0
CYUMBA	0	0
KYVUYÈ	332	74
TOTAL	3772	1623

ANNEXE F

TABLEAU PEDOLOGIQUE DES MARAIS

(Source: Scet/Coop 1970)

CLASSE	SOLS - CLASSE	GROUPE	NO-TATION	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES				
				COULEUR	COMPOSITION	COHESION CONSISTANCE	TENEUR EN EAU-HUMIDITE	
<b>XI. SOLS HYDROMORPHES</b>  Sols présentant des caractères dus à une évolution doucée par un excès d'eau quasi-permanent.	<b>XI. 1</b>  Sols hydromorphes organiques (Sols tourbeux oligotrophes)  Sols caractérisés par une teneur élevée en matières organiques peu évoluées, très peu humifiées, dont le taux est supérieur à 40 % du poids sec.	XI. 1.1 Tourbe grossière fibreuse à cypracées	TT	Marron foncé ou Noir	Débris végétaux noirs ou faiblement décomposés avec racines vivantes.	- Fibreux - Fauté - Spongieux	Gorgé d'eau	
		XI. 1.2 Tourbe Semi-fibreuse	TT	Marron foncé	Mélange de débris végétaux bruts (2/3 à 1/2) avec de la tourbe altérée	Fluent à mou sur 10 m environ puis de plus en plus compacté entre 10 et 20 m	Gorgé d'eau sur 10 m environ (80 à 90 %) puis humide à frais entre 10 et 20 abras.	
		XI. 1.3 Tourbe Altérée	Td	Noir	Débris végétaux presque totalement décomposés	Mou sur 10 abras environ puis de plus en plus compacté entre 10 et 20m	Mouillé 50 à 60 % sur 10 m environ puis humide à frais entre 10 et 20 m	
	<b>XI. 2</b>  Sols hydromorphes moyennement organiques. Sols caractérisés par une teneur en matières organiques partiellement humifiées de 15 à 40 %	XI. 2.1 Sol Semi-tourbeux à Amor	ST	Marron brun ou Noir	Mélange d'éléments minéraux généralement argileux et de matières organiques partiellement humifiées.	Plastique à l'état humide	Généralment humide	
		XI. 2.2 Sol Semi-tourbeux à Moll	STH	Noir		- meuble - grumeux à consistance moyenne.	Frais à humide	
	<b>XI. 3</b>  Sols hydromorphes Minéraux.  Sols minéraux dont l'hydromorphie s'explique dès la surface et sur la totalité du profil par l'apparition de tâches grises et rouilles formées par des composés réduits ou réoxydés tels que les oxydes de fer ou de manganèse.	XI. 3.1 Sols Hydromorphes minéraux humifères	YN	Brun foncé ou Noir	Éléments minéraux souvent argileux.	Meuble à agrégats finement polyédriques	Frais à humide	
		XI. 3.2 Sols Hydromorphes minéraux légèrement humifères	Yh	Brun ou Gris		consistance moyenne		
	<b>II. SOLS PEU ÉVOLUÉS</b>	<b>II. 4</b>  Sols peu évolués non climatiques formés par des apports de matériaux	II. 4.2 Sols d'apport alluvial à hydromorphie de profondeur (silt)	JA	Brun Pâle	Éléments minéraux de texture variée	Meuble	Frais
			II. 4.4 Colluvions de Ferrasols humifères à hydromorphie de profondeur (silt)	CFH	Brun ou Marron	Limon argileux	Meuble grumeux à consistance moyenne	Frais
	<b>X. SOLS FERRALITIQUES</b>	<b>FERRASOLS</b>  Sols minéraux riches en sesquioxydes de fer d'aluminium et en kaolinite	Ferrasols humifères à carapaces ou à gravillons ferrugineux	FN	Brun roux ou Marron	Limon sable-argileux	Meuble grumeux à consistance moyenne	Frais

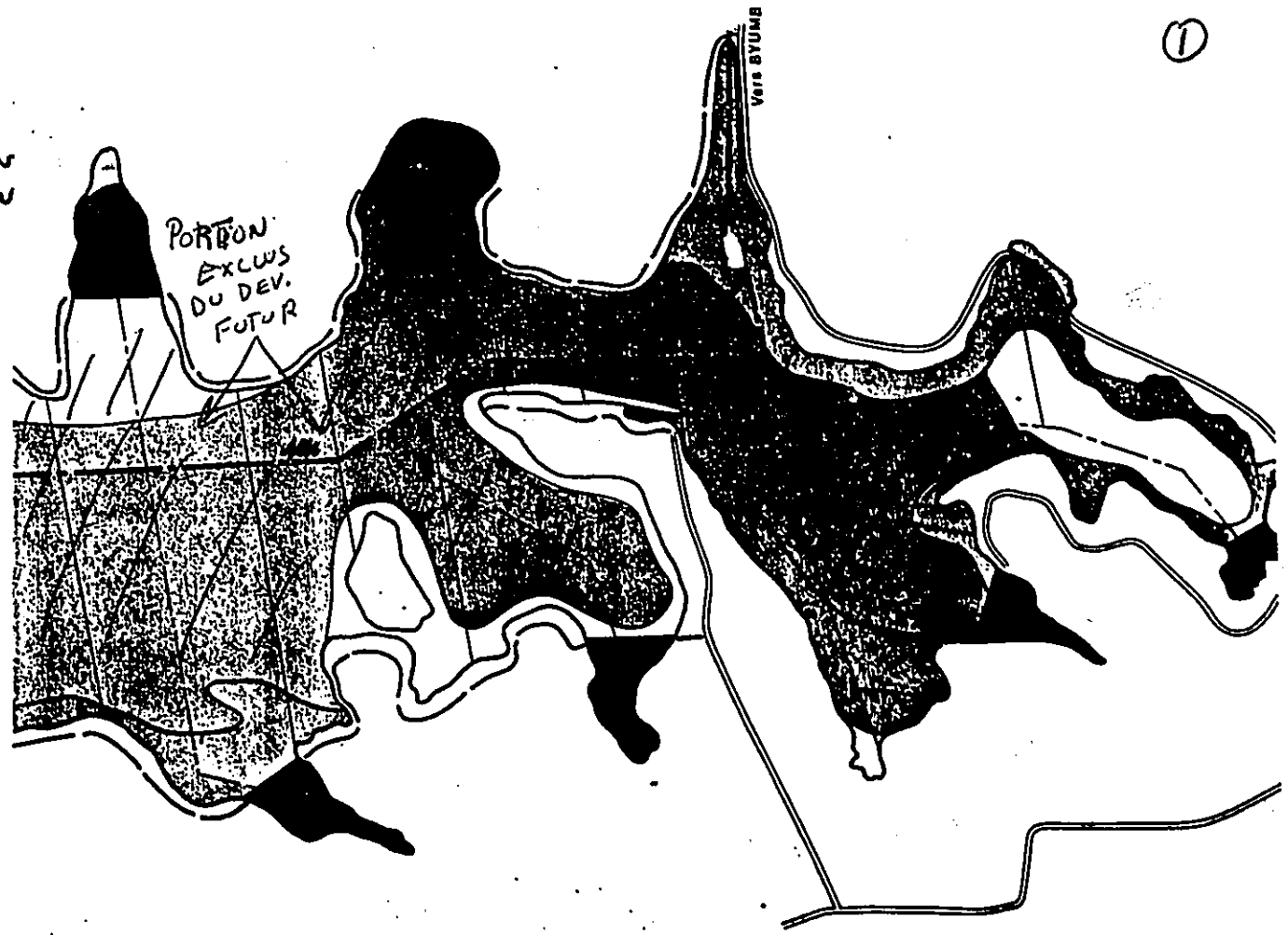
CARACTERISTIQUES CHIMIQUES					SUPERFICIES EN Ha.			RECOMMANDATIONS
PORTE AU FEU DU TERREIN EN MATIERES ORGANIQUES TOTALES	C/N	ETAT DES MATIERES ORGANIQUES	RESERVE EN BASES ECHANGEBLES. S En milligrammes	KAMIRANZUYU	KUBEZI	TOTAL		
15 à 25 %	4,0 à 5,0	Très	Matières Organiques Brutes ou peu évoluées	COMPLEXE	6,6	5629,1	5635,7	L'assainissement est nécessaire quelle que soit l'activité agricole envisagée. Le drainage doit être lent et progressif et le rabattement du plan d'eau ne doit pas excéder au moment de la mise en culture afin d'éviter une dessiccation irréversible et un tassement important.
60 à 85 %	4,0 à 5,0	Elevé	Organiques Brutes ou peu évoluées	COMPLEXE	329,0	239,1	569,0	L'amélioration de l'activité biologique et de la fertilité doit être complétée par le travail du sol (ados, planches) l'apport d'amendements calcaires et d'engrais azotés en particulier.
40 à 60 %	4,5 à 5,0		Évoluées	FORTEMENT	108,6	207,4	316,0	La culture du thé peut être envisagée sur la tourbe semi-fibreuse après travaux et expérimentation suivant l'exemple de la MULINDI.
15 à 40 %	4,0 à 5,0	17 à 40	Humus brut à minéralisation lente biologiquement peu actif.	INSATURE	15,9	242,9	258,8	L'assainissement est nécessaire quelle que soit l'activité agricole envisagée. Le drainage doit être conduit de la même façon que pour les sols tourbeux ainsi que l'amélioration de la fertilité avec de meilleures chances de réussite et un tassement moins important.
		8 à 17	Mat. Org. assez bien humifiées		118,8		118,8	Les sols semi-tourbeux à null sont les plus favorables. La culture de thé peut être envisagée sous réserve d'un rabattement de plan d'eau à 1 m 20, de correction de la fertilité (engrais, amendements).
6 à 15 %	4,5 à 5,0	10 à 17	Matières Organiques assez bien humifiées	BONNE	30,8		30,6	L'assainissement de surface ou le drainage sont nécessaires quelle que soit l'activité agricole envisagée à l'exception du riz.
3 à 6 %	5,0	17		MOYENNE	5,1	6,5	11,6	Ces sols bien pourvus en matières organiques humifiées mais acides, conviennent aux cultures vivrières ou fourragères après travail du sol (ados, planches) et correction de la fertilité (engrais, amendements) et aux cultures industrielles (thé...) sous réserve d'un rabattement de la nappe à 1 m 20 et de correction de la fertilité (engrais, amendements).
Moyennement pourvu 2 à 3 %	5,0 à 5,3		Matières Organiques assez bien humifiées	ASSEZ PAUVRE	17,0		17,0	L'assainissement est souhaitable pour les cultures à enracinement profond lorsque l'hydromorphie de profondeur est fortement exprimée sous forme de gley.
				1 à 4 me				Ces sols assez pauvres en réserves de bases nécessitent une fumure de fond et l'apport d'amendements calcaires. Les cultures exigeantes ne sont pas souhaitables.
8 à 17 %	5,0	10	Matières organiques bien humifiées	BIEN POURVU	10,0		10,0	Sols dont l'assainissement est inutile sauf s'il s'agit de cultures pluriannuelles très sensibles au moindre excès d'eau. Par contre l'assainissement est souhaitable pour les cultures à enracinement profond (ex. thé) qui nécessitent un rabattement de la nappe à 1 m 20.
			Null acide	25 me				Ces sols fertiles permettent toutes les cultures non sensibles à l'acidité, celle-ci pouvant être corrigée par ailleurs.
10 à 13 %	4,8	12 à 16	Matières organiques bien humifiées à évolution rapide	BIEN POURVU	9,5			Ces sols fertiles permettent les cultures à enracinement peu profond, et peu sensibles à l'acidité, celle-ci pouvant être corrigée par ailleurs.

**ANNEXE G**

**PLAN DE MISE EN VALEUR AGRICOLE: EQUIPEMENTS PROPOSES**

**(Source: Scet/Coop 1970)**








2/2



# PLAN DE MISE EN VALEUR AGRICOLE EQUIPEMENT PROPOSÉ par SCET

ÉCHELLE 1/30.000

## LÉGENDE

-  Canal principal
-  Canal de décharge
-  Drain
-  Digue
-  Barrage
-  Route
-  Piste proposée

ZONE IV

PORTION DU PROJET  
INITIAL EXCLUS DU DEVELOPPEMENT  
FUTUR

Vers BYUMBA

BARRAGE  
EXCLUS

Ruhunde ■



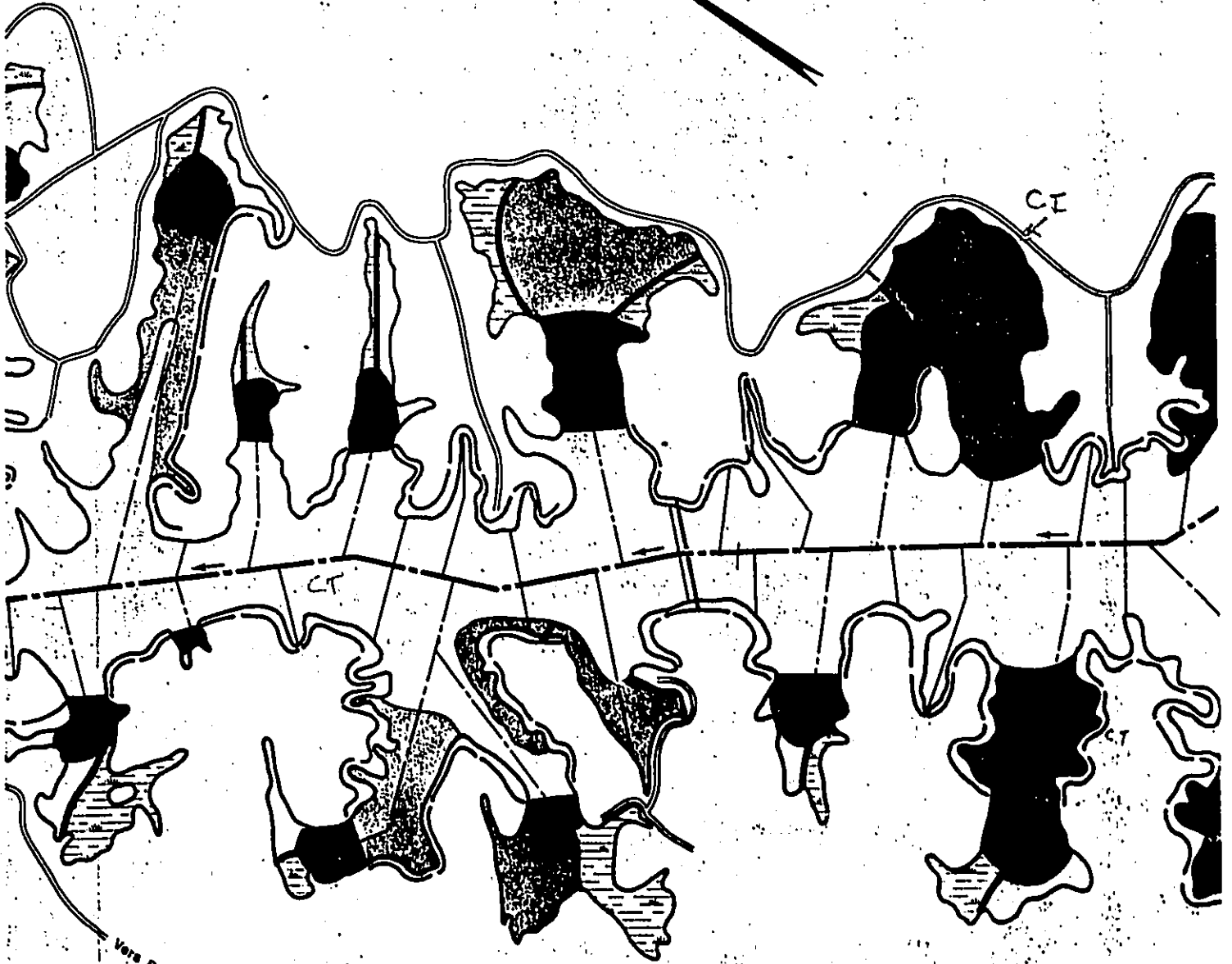
ZONE III





■ Station I.S.A.R Rwerere

ZONE II



Vers RUKENGERI




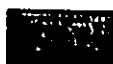


ZONE I

VERS OUGANDA

Runaba

VERS RUHENGERI

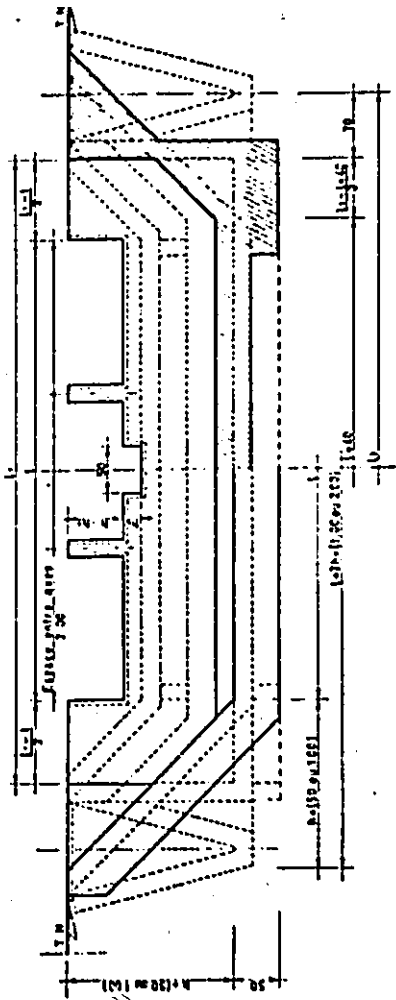
LÉGENDE

-  L \_\_\_\_\_ Lac de rétention
-  \_\_\_\_\_ Zones de boisement
-  CT \_\_\_\_\_ Cultures traditionnelles
-  Ci \_\_\_\_\_ Cultures industrielles
-  CF \_\_\_\_\_ Cultures fourragères
-  T \_\_\_\_\_ Thé

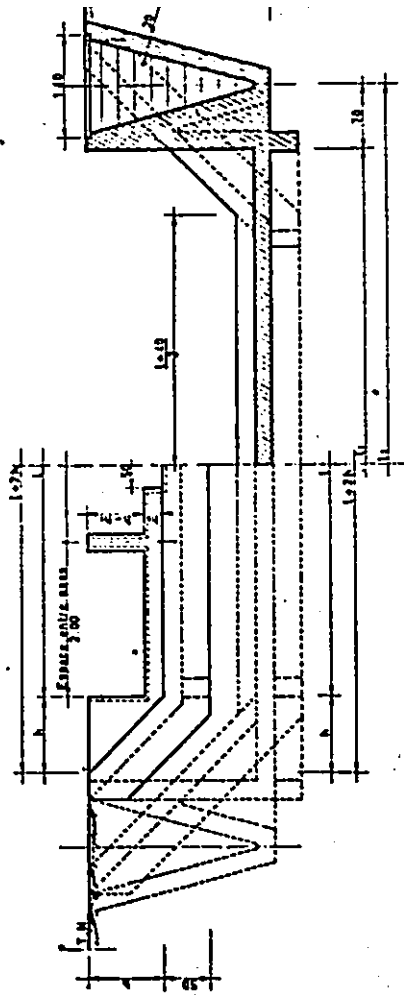




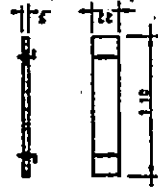
Chute de 0.5 à 1.0  
à plafond var  
(drains principaux et



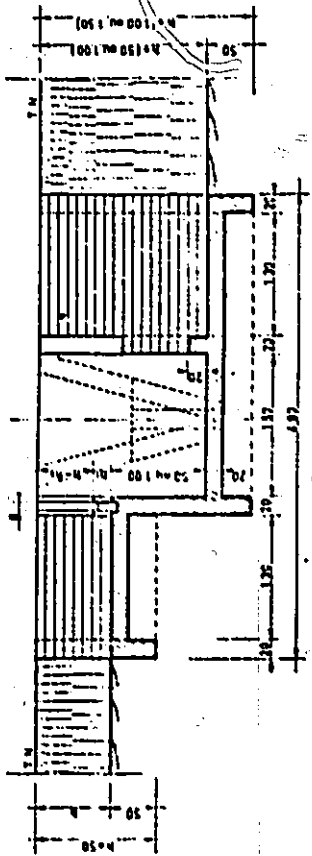
COUPE C.C.



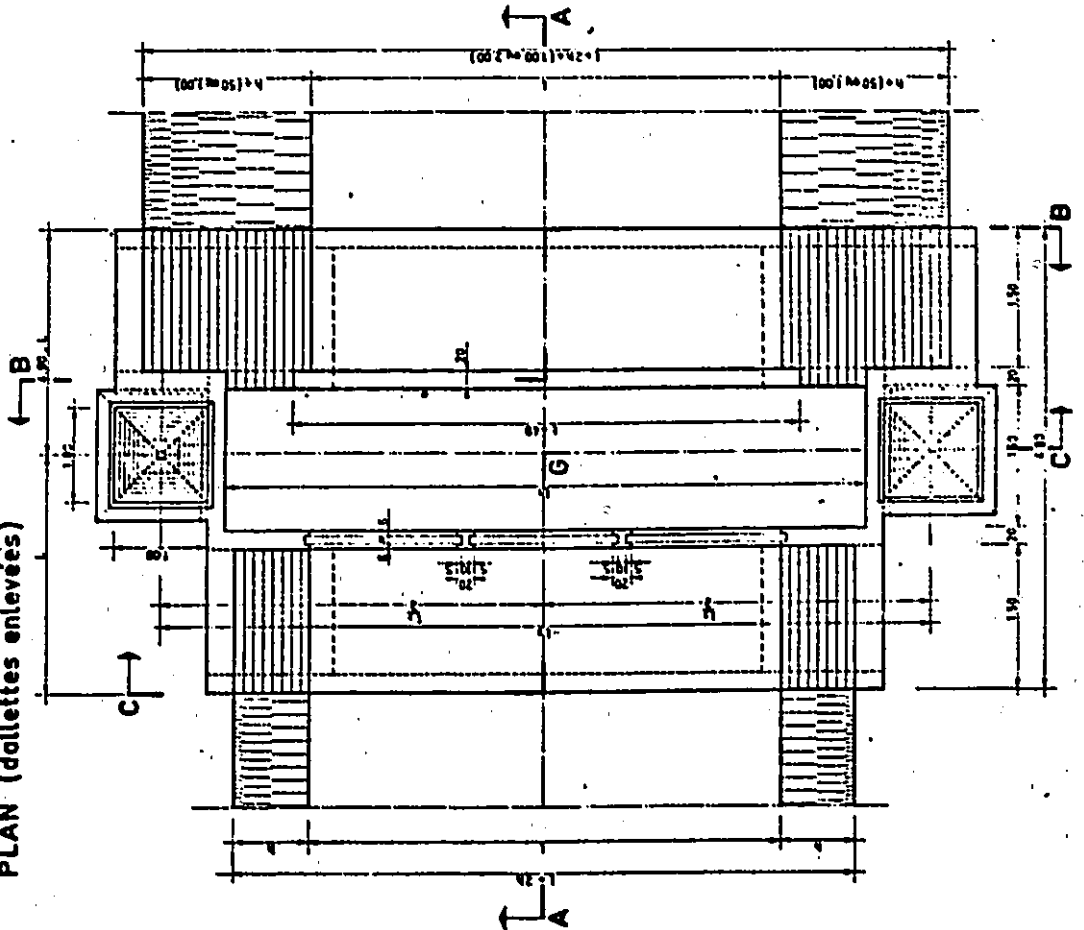
DALLETES



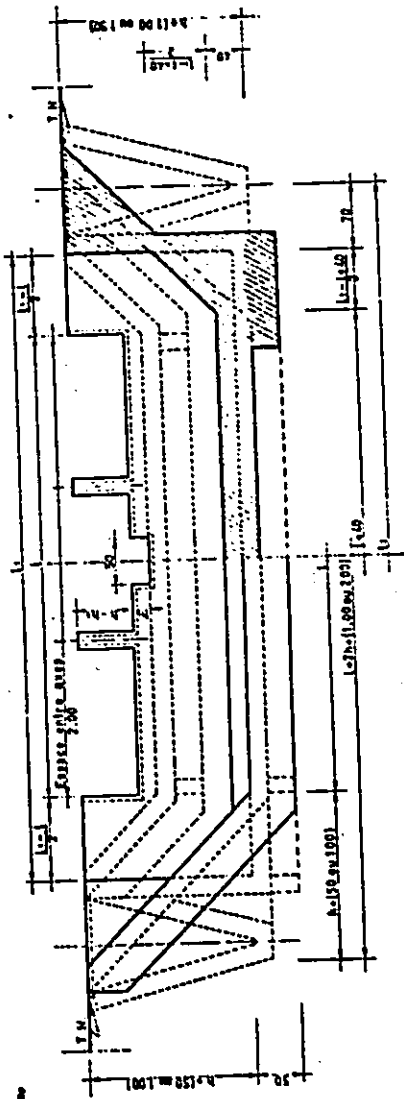
NOTA: 0.50 m de pente  
de l'ouvrage.



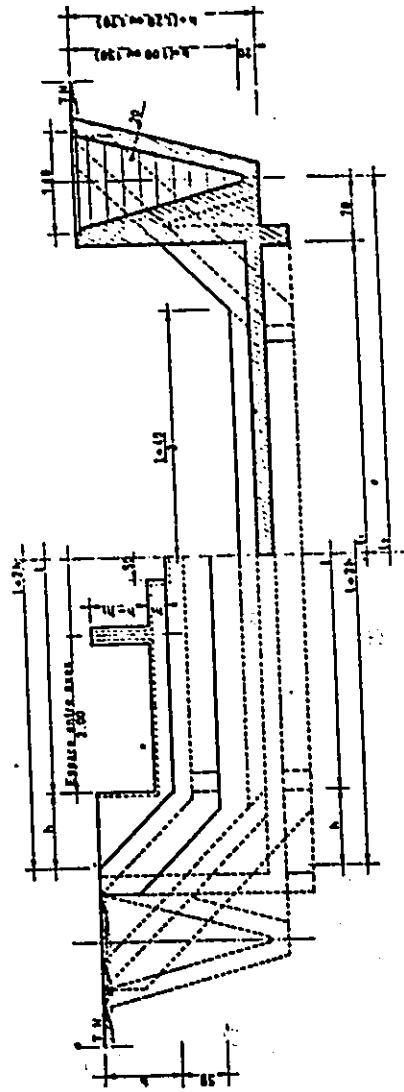
PLAN (dalles enlevées)



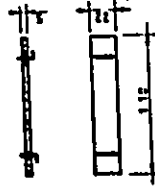
COUPE B.B.



COUPE C.C.

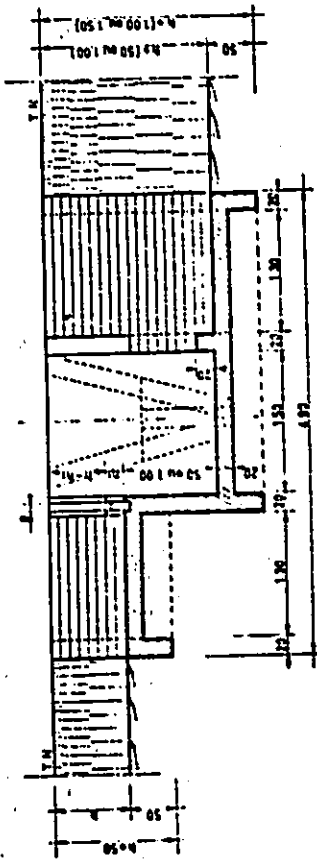


DALLETTES

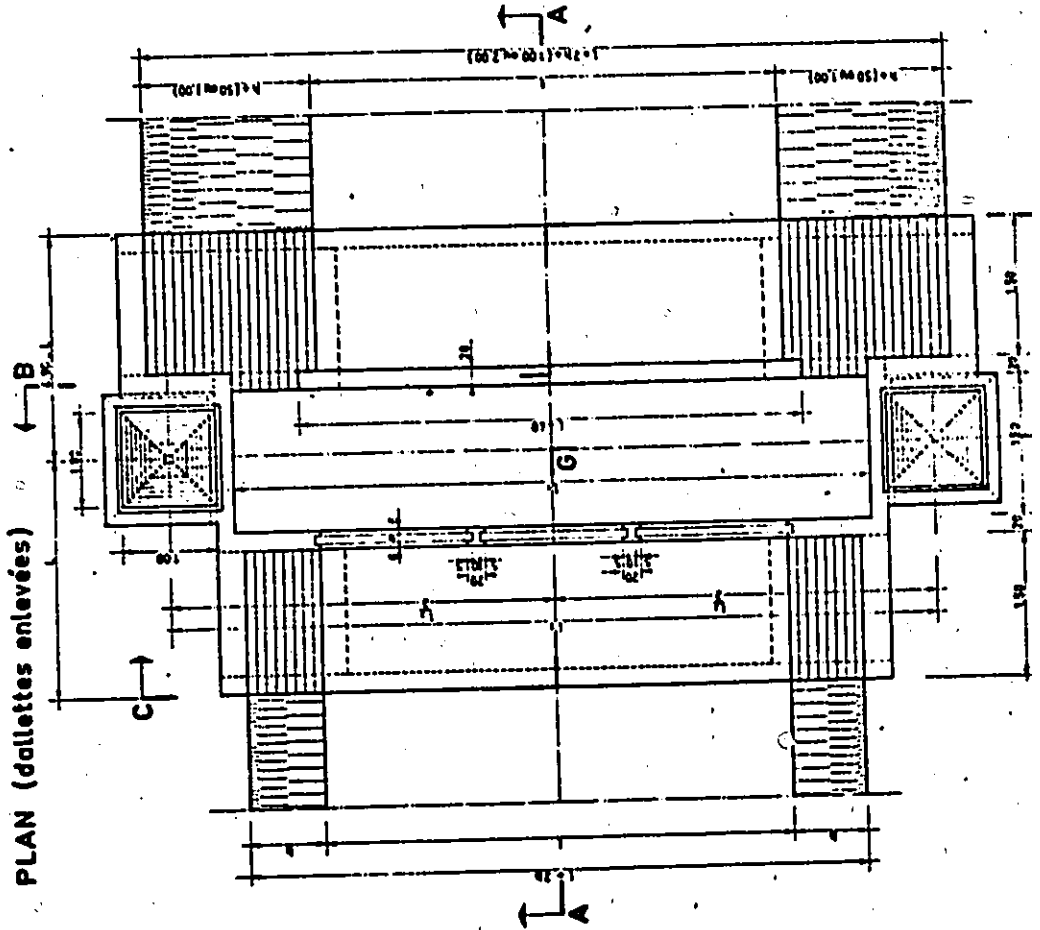


020 - 0 centre de grille  
de l'ouvrage.

COUPE A.A.



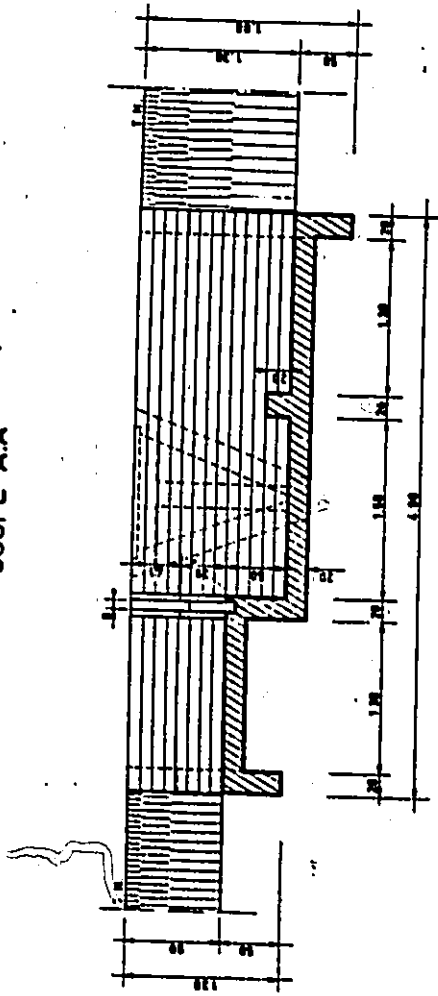
PLAN (dallettes enlevées)



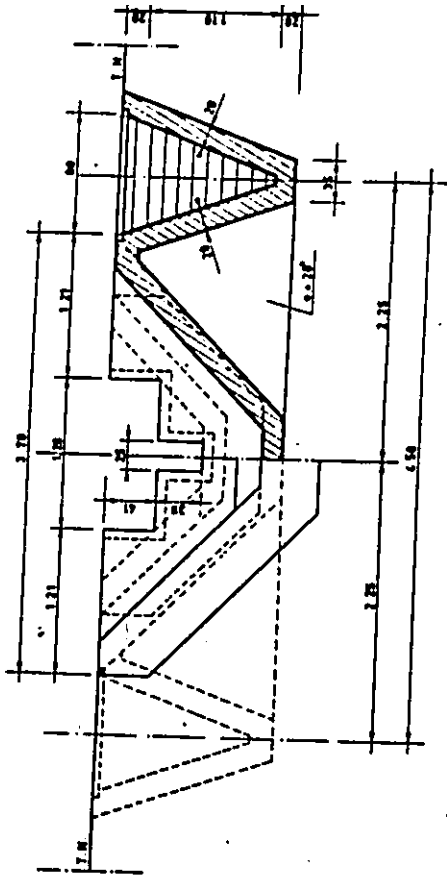
Chute de 0.5 à 1.00 mètre  
à plafond variable  
(drains principaux et collect)



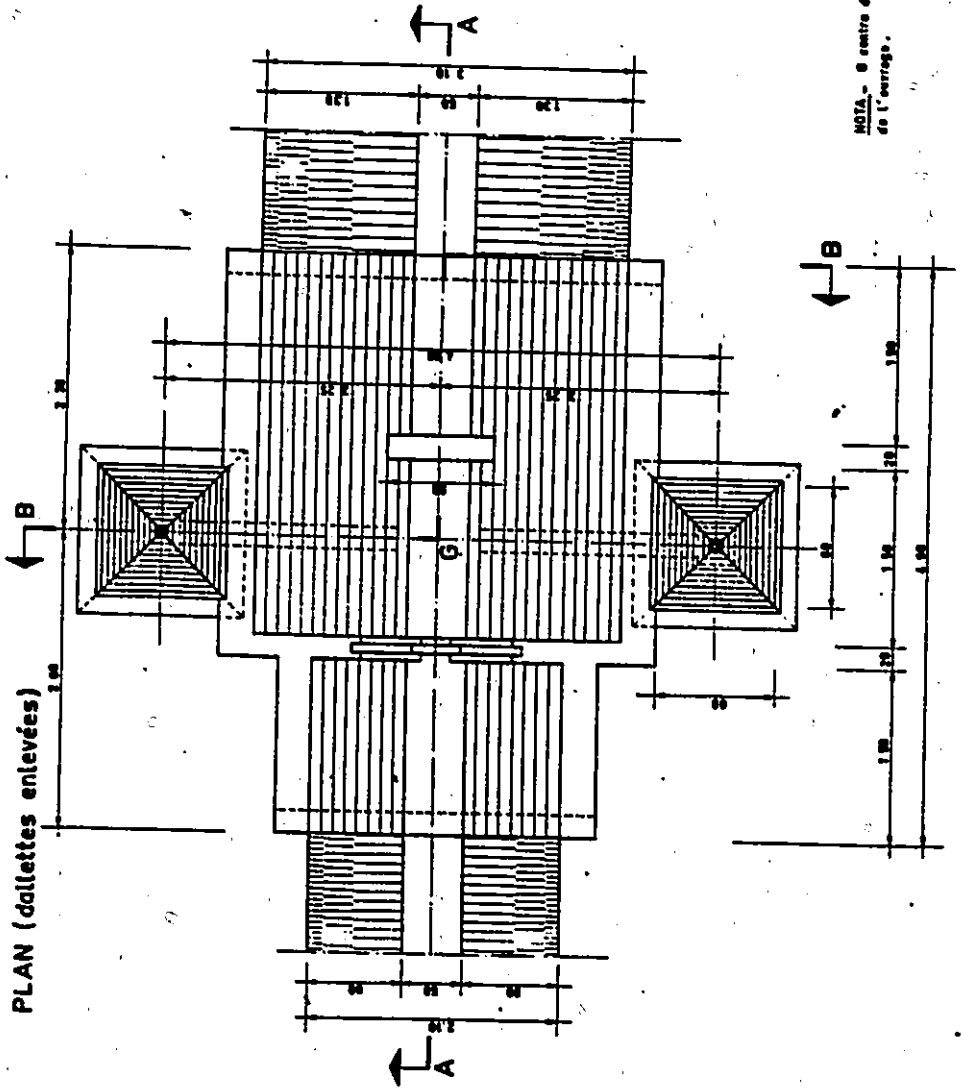
COUPE A.A



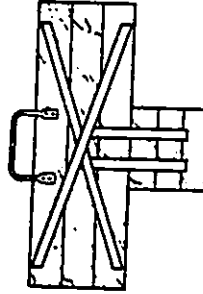
COUPE B.B



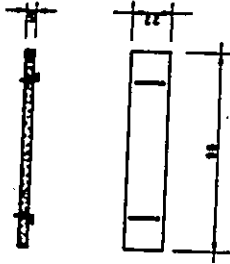
PLAN (dallettes enlevées)



VANNETTE



DALLETTE



NOTA - Ø centre de gravité de l'ouvrage.



Chute de 0,5 à 1,00 mètre à plafond constant (drains secondaires)

Type d'ouvrage	Superficie en ha				
	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV	TOTAL
Canaux collecteurs	17	29	65	21	132
Canaux principaux	5	18	32	23	68
Canaux secondaires	24	91	80	57	252
Drains parcelle	52	201	177	126	556
Pistes	8	32	28	20	88
Lacs de rétention et zones d'écou- lement eaux de ruissellement	81	195	100	95	471
<b>TOTAL</b>	<b>187</b>	<b>566</b>	<b>472</b>	<b>342</b>	<b>1.567</b>
% de la superficie brute	28,7 %	22,5 %	21,3 %	21,6 %	22,5 %

**ANNEXE H**  
**CALCUL PRELIMINAIRE DU POTENTIEL ENERGETIQUE**  
**AU SITE RUGEZI/RUSUMO**

## 1.0 GENERALITES

Pour les fins de calcul préliminaire, nous posons certaines hypothèses de base:

- débit écologique à maintenir à la sortie des marais = débit minimum mesuré  
= 0,32 m<sup>3</sup>/s
- efficacité des turbines = e = 0,84
- type de turbine: Francis à axe vertical  
gamme d'opération: de 30 à 115% du débit de conception
- hauteur de chute brute = h<sub>b</sub> = 170 m
- hauteur de chute effective = 95% de h<sub>b</sub> = 161 m
- stockage est négligeable, donc c'est une centrale en continue.

2.0 SCENARIO 1: SANS FELS ET SANS AMENAGEMENT HYDRO-  
AGRICOLE

a) Calcul de la puissance

L'équation de base de la puissance est:

$$P = 9,81 \times Q \times h \times e \quad \text{kW}$$

ou  $Q$  = débit en  $\text{m}^3/\text{s}$

$h$  = hauteur de chute effective en m

$e$  = efficacité = 0,84

A partir des données de débits mensuels du tableau 6.3a, nous avons construit la courbe des débits classés montrée à la figure 1. Suivant les recommandations de l'Electric Power Research Institute (1981), il n'est pas économique en général d'établir un débit de conception pour les débits qui ne sont dépassés que 15% du temps. Nous avons donc retenu comme débit de conception ou débit d'équipement:

$$Q_c = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

Suivant les caractéristiques des turbines Francis, nous savons que:  $Q_{\text{max}} = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_{\text{min}} = 0,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'aire hachurée sous la courbe représente donc le débit moyen turbinable duquel nous déduisons le débit écologique à maintenir en rivière.

Nous obtenons que:

$$Q_{\text{moyen}} = (1,8 - .32) \times .15 + \frac{(1,8 + .54 - .32 - .32)}{2} \cdot .75$$

2



3.0 SCENARIO 2: AVEC FELS, MAIS SANS AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE

Nous supposons ici que la forme de la courbe des débits restera la même, sauf que les valeurs augmenteront au pro-rata de l'augmentation de la superficie du bassin versant, c'est-à-dire:

$$F = \frac{19426}{14761} = 1,32$$

Si nous appliquons ce facteur aux résultats précédents nous savons que:

$$Q_c = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_m = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_i = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_m = 1,5 \text{ MW}$$

$$E_m = 12,8 \text{ GWh}$$

4.0 SCENARIO 3: AVEC DEVELOPPEMENT HYDRO-AGRICOLE

a) Simulation des débits

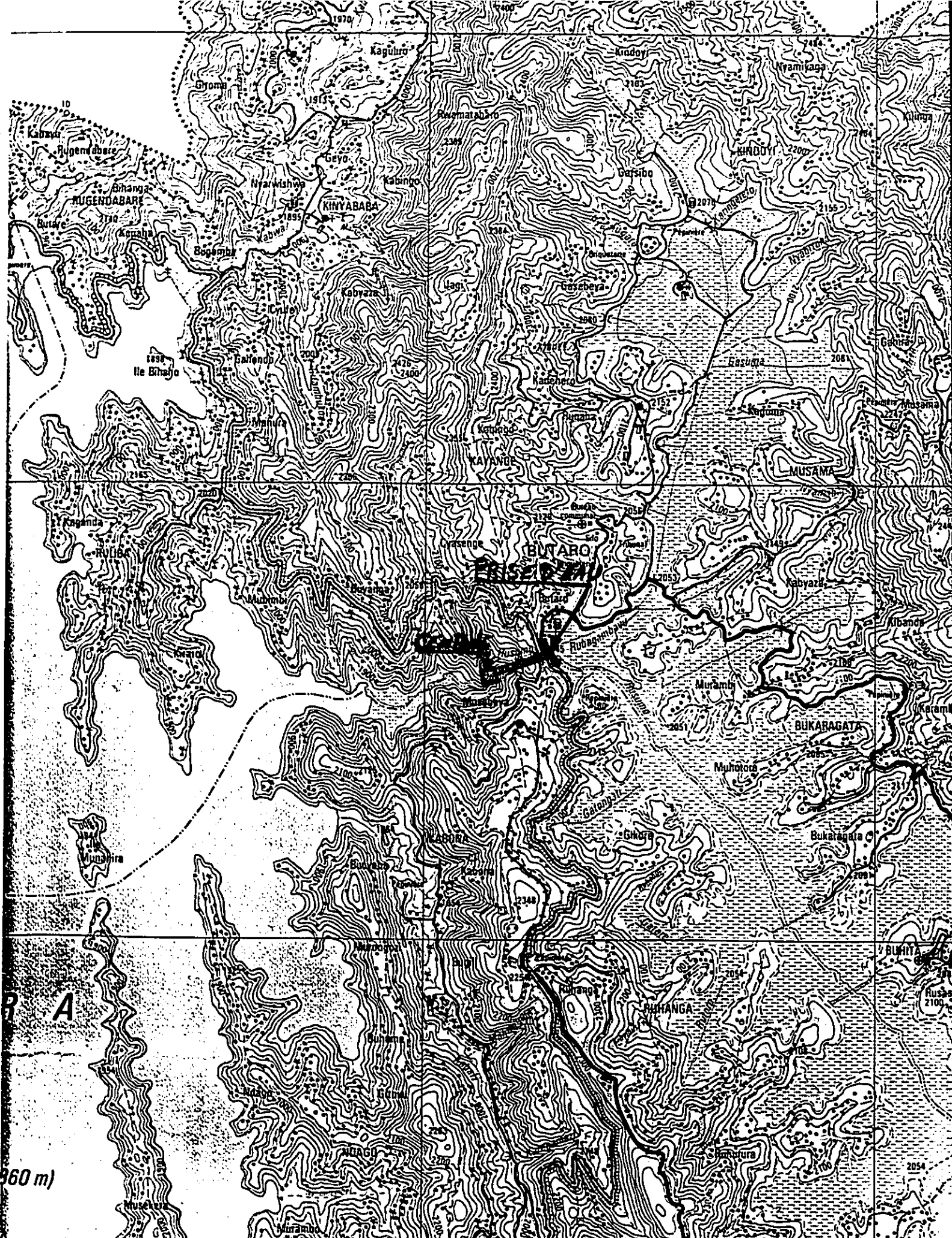
En posant que l'effet principal du drainage sera de réduire le temps de réponse du bassin de telle sorte que le ruissellement d'un mois donné sera généré par la précipitation du même mois et en tenant compte de l'évapotranspiration des marais en culture, nous avons au tableau 7.7 estimé le ruissellement mensuel sans réservoir autre que le stockage dans les tourbes. Ces calculs nous donne pour chaque mois un facteur de pointe mensuelle que nous avons appliqué au tableau 6.3a pour obtenir le tableau 6.3c d'où nous tirons la courbe des débits classés de la figure 2.

A partir de cette courbe, nous avons repris la méthode de calcul du scénario 1 pour trouver que:

- Débit de conception =  $2,5 \text{ m}^3/\text{s} = Q_c$
- Débit minimum =  $0,30 \times Q_c = 0,75 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{\text{min}}$
- Débit maximum =  $1,15 \times Q_c = 2,9 \text{ m}^3/\text{sec}$
- Débit moyen  $Q = (2,5 - ,32) \times ,15 + (2,5 - ,32 + ,75 - ,32) \times ,56$   
 $Q = 1,06 \text{ m}^3/\text{sec}$

- donc  $P_i = 9,81 \times Q_c \times h \times e$  kw  
 $P_i = 3,3 \text{ Mw}$  Puissance installée
- $P_m = 9,81 \times Q \times h \times e$  kw  
 $P_m = 1,4 \text{ MW}$  Puissance moyenne

$$| E_m = P_m \times 8,76 = 12,3 \text{ Gwh} |$$



60 m)

FIGURE 1 : Débits classés  
Sans Fels et sans aménagements hydro-agr

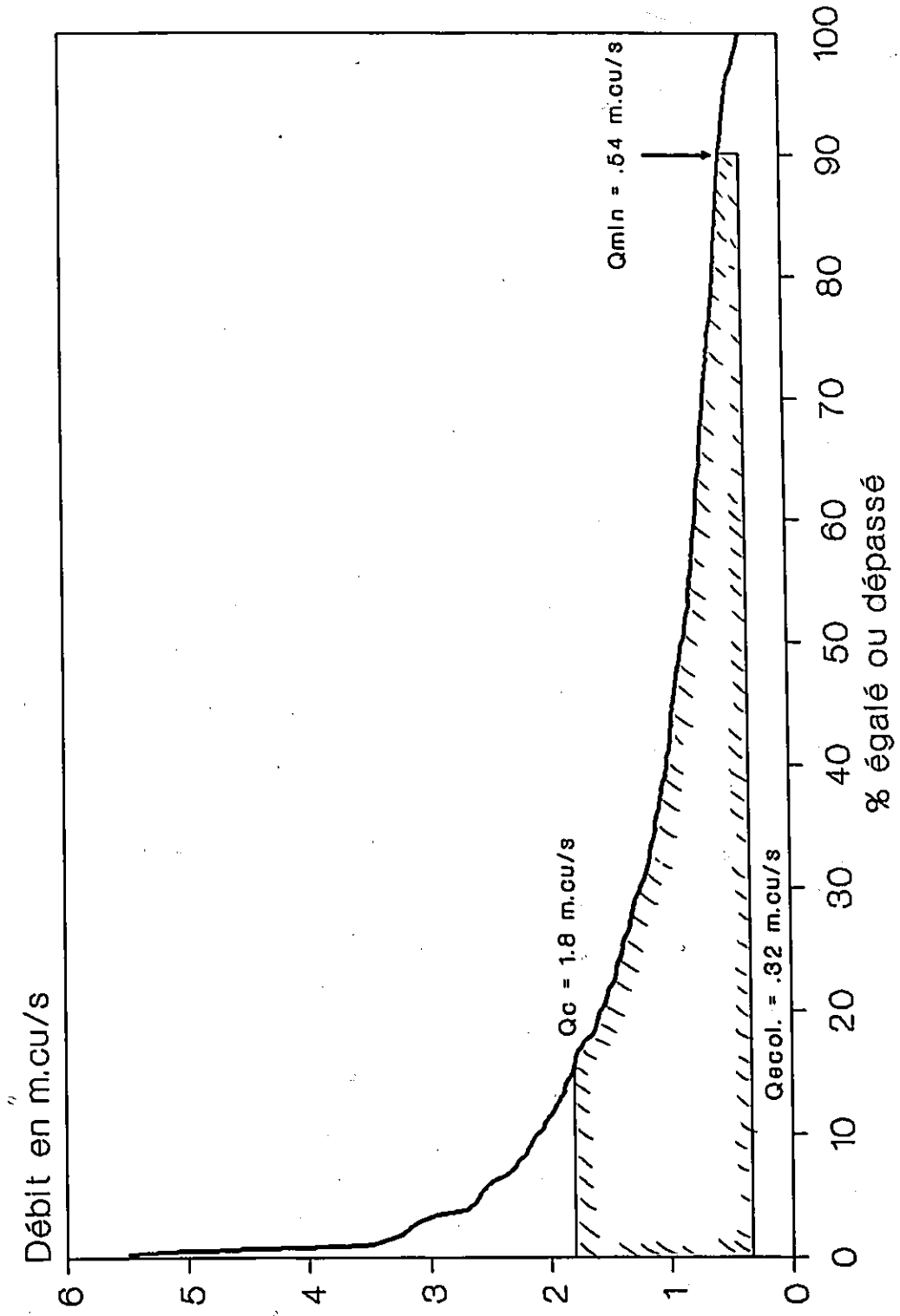
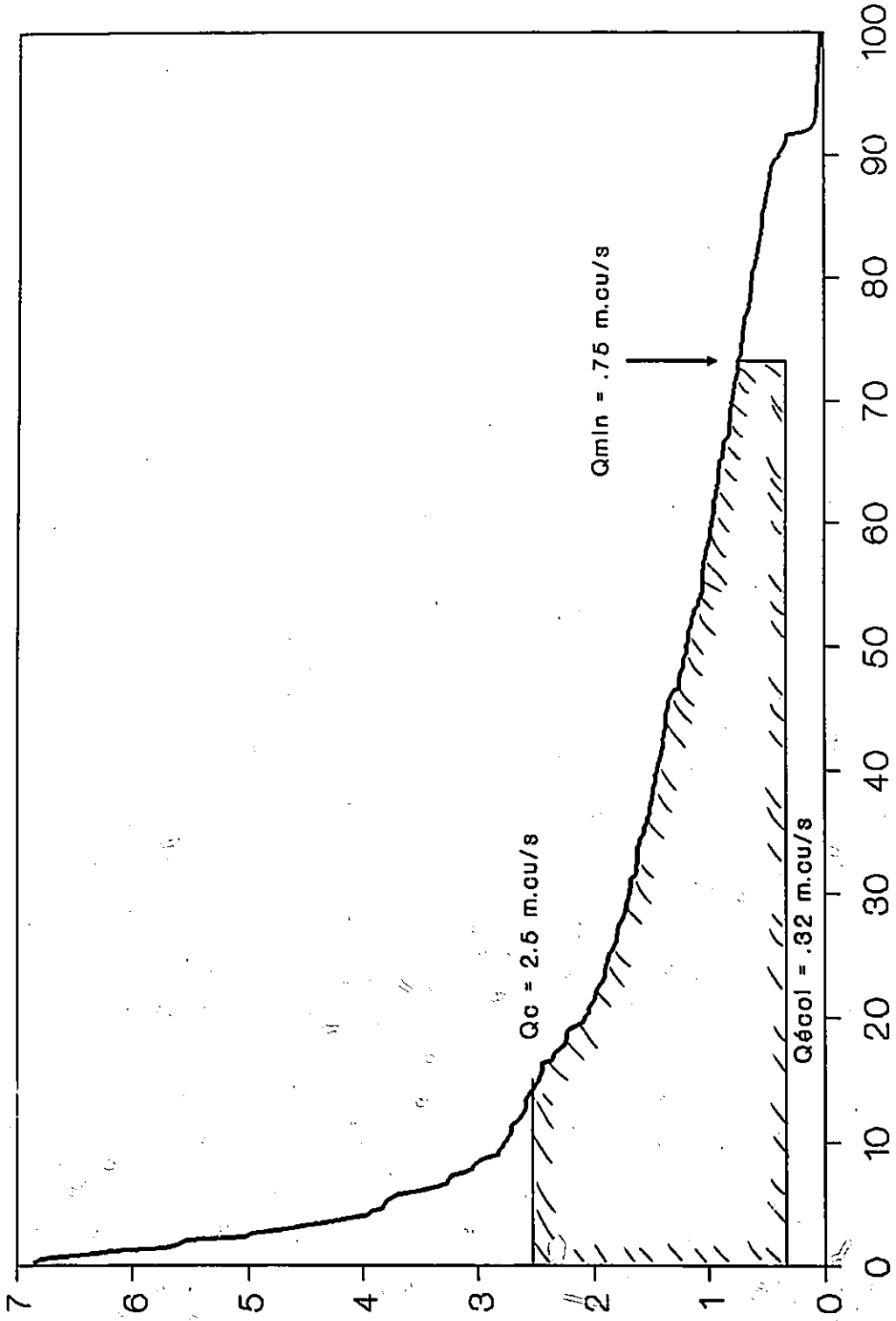


FIGURE 2 : Débits classés  
Avec développement hydro-agricole



**TABEAU : RUISSELLEMENT MENSUEL AVEC AMENAGEMENT DU MARAIS RUGESI**

	JAN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
PRRC.	76.3	99.9	140.7	192.7	122.4	32.2	23.2	51.4	117	123.8	140.6	93.5
BTRm	13.7	13.2	11.9	22.8	1.9	2.1	5.0	7.5	10.9	2.9	8.8	7.9
BTRv	19.2	36.5	59.0	48.1	45.5	22.4	9.0	11.5	48.1	70.5	67.3	44.9
BTRmc	12.2	17.8	27.2	20.0	21.1	11.7	13.1	26.9	32.8	34.7	27.2	12.8
BTRab	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
STOCK	-10.2	-2.0	11.1	29.1	15.5	-30.3	-25.4	-9.7	5.5	10.1	10.8	-4.4
RUI+DRA	36.7	29.9	26.9	68.2	33.7	21.7	17.0	10.5	15.2	1.0	22.0	27.8
RUISS.	14.9	12.8	18.6	32.0	42.8	24.4	14.2	10.9	12.2	16.5	20.3	19.2
P.CORR	2.46	2.33	1.45	2.13	0.79	0.89	1.19	0.97	1.25	0.06	1.08	1.45

TABLEAU 8.5: DEBITES MENSUELS SIMULES (m.cu./sec.) SOURCE: TABLEAU 6.3a

STATION: RUGZII		LONG. EST: 29 49'		SUPERFICIE: 19426 ha.								
COTE: 2044 m.		LAT. SUD: 1 25'										
ANNEE	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT.	NOV.	DEC.
1957								0.813	0.642	0.033	0.751	1.114
1958	1.981	1.788	1.935	6.783	3.953	1.962	1.257	0.532	0.686	0.039	0.537	1.596
1959	2.252	1.873	1.061	3.046	1.983	1.021	0.636	0.429	0.912	0.080	1.564	1.327
1960	2.480	1.534	0.799	3.228	0.868	0.459	0.466	0.323	0.553	0.029	0.480	0.542
1961	0.790	0.869	0.618									
1962			1.167	2.545					1.198	0.101	3.821	2.582
1963	6.189	2.670	1.461	5.527	4.337	2.991	0.917	0.335	0.776	0.028	0.741	2.004
1964	2.594	1.450	1.167	3.939	1.616	0.619	0.509	0.361	0.531	0.046	0.595	1.114
1965	3.054	2.237	1.061	4.533	1.246	0.684	0.551	0.348	0.597	0.048	0.949	1.461
1966	1.891	1.618	2.777	2.946	1.246	0.619	0.530	0.395	0.821	0.032	0.712	0.903
1967	1.049	0.808	0.465	1.405	2.045	1.188	0.786	0.396	0.747	0.050	0.869	2.292
1968	1.712	2.345	2.004	5.029	1.686	1.348						1.799
1969	1.224	2.453	2.582	2.745	1.028	0.475	0.520	0.327	0.575	0.030	0.518	0.773
1970	1.356	1.366	1.114	2.445	1.616	0.856	0.700	0.498	0.620	0.057	1.048	0.903
1971	1.396	1.187	0.706	4.678	2.564	1.424	1.169	0.606	0.719	0.059	1.008	1.260
1972	1.869	2.518	2.471	4.967	2.712	2.222	1.716	0.628	0.810	0.047	1.502	1.515
1973	1.400	1.555	0.812	2.785	1.807	1.222	0.689	0.446	0.923	0.049	1.902	1.528
1974	1.891	1.366	1.908	6.846	1.487	1.671	2.710	1.036	1.394	0.046	0.810	1.048
1975	1.689	1.492	1.354	5.610	1.556	1.155	1.048	0.707	1.839	0.168	1.625	1.636
1976	1.756	1.618	0.995	2.069	1.677	1.255	0.949	0.911	1.140	0.053	1.038	1.367
1977	2.246	3.356	1.798	3.690	1.516	1.090	0.963	0.720	0.923	0.038	2.104	2.638
1978	2.733	2.583	3.748	5.717	2.447	1.172	0.982	0.707	0.878	0.055	1.048	1.515
1979	2.594	3.259	2.086	3.511	1.731	1.424	1.191	0.938	0.709	0.031	0.585	0.812
1980	1.400	1.366	0.956	2.825	1.906	1.603	0.971	0.541	0.776	0.034	1.421	1.677
1981	2.230	1.618	0.969	3.107	2.338	1.138	0.873	0.902	1.048	0.056	1.088	1.022
1982	1.578	1.303	0.799	3.268	2.447	1.782	0.993	0.550	0.980	0.064	1.861	2.361
1983	1.981	1.471	0.956	2.505	1.217	0.741	0.711	0.541	0.832	0.113	2.182	2.707
1984	2.823	2.044	1.731	3.796	0.905	0.652	0.657	0.498	0.642	0.052	1.038	1.220
1985	1.445	1.366	1.394	6.405	1.677	0.980	0.743	0.481	0.664	0.069	0.949	1.394
1986	1.725	1.618	1.468	4.176	1.792	1.346	0.631	0.465	0.620	0.033	0.585	0.779
1987	1.615	1.495	1.707	3.832	1.482	1.828	0.935	0.506	0.762	0.074	2.336	
MOY.	2.025	1.821	1.483	3.883	1.858	1.236	0.935	0.580	0.865	0.056	1.250	1.532
STD.	1.020	0.668	0.758	1.395	0.697	0.550	0.465	0.204	0.291	0.031	0.719	0.588
MAX.	6.189	3.356	3.748	6.846	4.337	2.991	2.710	1.036	1.839	0.168	3.821	2.707
MIN.	0.790	0.808	0.465	1.405	0.905	0.475	0.509	0.327	0.531	0.028	0.518	0.773
MBRE.	25	25	26	25	24	24	23	23	24	24	24	25

note: les moyennes et données statistiques sont calculées pour la période de 1961 à 1986