

# CAHIERS SCIENTIFIQUES

PUBLIÉS SOUS LES AUSPICES DU CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL



N° 4

I. VANDERKAMER 77

## BOIS ET FORETS DES TROPIQUES

# CAHIERS SCIENTIFIQUES

PUBLIÉS SOUS LES AUSPICES DU CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL

N<sup>o</sup> 4

Octobre 1974

**SUPPLÉMENT DE BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES**

Édité par le CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL  
45 bis, Avenue de la Belle-Gabrielle, 94130 NOGENT-SUR-MARNE (FRANCE)

Le numéro : 15 F

---

Reproduction même partielle interdite sans autorisation des auteurs  
et de la revue BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES.

---

# ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU COUVERT NATUREL ET DE SES MODIFICATIONS A MADAGASCAR

## EXPÉRIMENTATIONS EN BASSINS VERSANTS ÉLÉMENTAIRES

par

C. BAILLY

*Conservateur des Eaux et Forêts, Directeur du Centre Technique Forestier Tropical de Madagascar*

G. BENOIT de COIGNAC

*I. G. R. E. F., Chef de la Division Sol Forêt du C. T. F. T. Madagascar*

C. MALVOS

*Ingénieur de Recherches à la Division Sol-Forêt du C. T. F. T. Madagascar*

J. M. NINGRE

*I. G. R. E. F., V. S. N. stagiaire année 1972 à la Division Sol-Forêt du C. T. F. T.-Madagascar*

J. M. SARRAILH

*Assistant à la Division Sol-Forêt du C. T. F. T. Madagascar*



## SOMMAIRE

PRÉFACE, PAR M. GEORGES RAMANANTSOAVINA.....	3
PRÉAMBULE .....	5
INTRODUCTION .....	6
Zone des Hauts-Plateaux.....	6
Zone de forêt tropicale d'altitude.....	6
Zone sub-aride du sud de Madagascar (Antanimora).....	8
Zone côtière nord-ouest (Befandriana-Nord).....	8
DESCRIPTION DES EXPÉRIMENTATIONS EFFECTUÉES.....	9
Zone des Hauts-Plateaux — Manankazo.....	9
Zone de forêt tropicale d'altitude.....	15
Zone sub-aride du sud de Madagascar (Antanimora).....	22
Zone côtière nord-ouest (Befandriana-Nord).....	26
RÉSUMÉ DES PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS.....	29
Influence des couverts naturels en zone forestière. Expérimentation sur les bassins versants de Betsakotsako, Ampangalatsary, Marolaona .....	29
Comparaison des bilans annuels sous trois couverts différents .....	29
Evolution saisonnière des débits.....	38
Comparaison des ruissellements journaliers.....	40
Etude des hydrogrammes de crues et des paramètres de crues.....	48
Conclusion .....	58
Influence des mises en culture en zone forestière — Périnet — Expériences sur les bassins versants 71-72-73.....	62
Sur le ruissellement superficiel.....	62
Influence sur les pertes en terre .....	65
Application et conclusion.....	66
Influence de la mise en valeur des steppes à graminées des Hauts-Plateaux .....	68
Influence du couvert sur le ruissellement superficiel.....	68
Influence du couvert sur l'eau dans le sol .....	75
Influence du couvert sur les pertes en terre .....	81
Poursuite et amélioration de l'expérimentation — Conclusion.....	83
Influence de l'aménagement des terrains de parcours de l'Androy cristallin en vue de l'amélioration des ressources en eau (Antanimora).....	85
Effet de l'aménagement sur la nature du ruissellement.....	86
Etude du débit d'étiage.....	88
Conclusion — Effet global.....	91
Bilan de l'eau d'une retenue collinaire destinée à l'irrigation dans le Nord-Ouest.....	92
Bilan de l'eau.....	92
Classement des crues en fonction du volume ruisselé et du coefficient de ruissellement.....	92
Classement des crues en fonction du débit instantané maximal.....	93
Conclusion .....	94

RÉSUMÉ — ESSAIS DE SYNTHÈSE.....	97
Dans la zone des Hauts-Plateaux.....	97
En zone forestière.....	97
Dans le Sud.....	98
Dans le Nord-Ouest de l'Île.....	99
ANNEXE I. — DISPOSITIF MIS EN PLACE A MANANKAZO.....	105
ANNEXE II. — ETUDE DU BILAN DE L'EAU DES GRANDS BASSINS VERSANTS DE PÉRINET.....	107
BIBLIOGRAPHIE .....	111
RÉSUMÉS EN ANGLAIS, ALLEMAND, ESPAGNOL.....	112

## PRÉFACE

Il m'a été demandé de présenter cette publication sur l'étude comparative de Bassins versants. C'est là une tâche aussi délicate que difficile mais aussi, dans un certain sens, agréable, car ainsi je puis m'associer à mes collègues forestiers pour soumettre au lecteur les résultats des actions de ceux qui ont pour vocation de travailler dans le silence et l'isolement et qui ne sont pas toujours compris dans leurs initiatives. Et ce document apparaît comme le fruit de cette volonté farouche de contribuer à quantifier des phénomènes, qui souvent sont constatés par des initiés et toujours ignorés de tous. C'est une publication très technique en elle-même mais qui trouve sa large place dans le contexte économique du développement de Madagascar. Elle se veut et se doit d'être pratique, vise des applications et ne se cantonne guère dans des spéculations théoriques.

Les facteurs de dégradation et de destruction du couvert naturel à Madagascar sont en effet très nombreux : l'action répétée et inconsiderée des feux de brousse, la cadence croissante des défrichements des forêts avec des sols de nature fragile, constituent les deux graves menaces de l'équilibre biologique et qui auront des conséquences néfastes directes sur l'économie agricole dont vivent 85 % des populations de ce pays. La connaissance des mécanismes de dégradation permet l'élaboration d'une stratégie plus adaptée de lutte contre les facteurs de cette dégradation.

Par ailleurs, si les lois de l'hydrologie et de l'hydraulique semblent être connues, des formules existent sur le calcul du déficit d'écoulement, sur les temps de concentration ... l'on sait que les réalités sont souvent tout autres. Les expérimentations aux champs restent de très loin instructives et pratiques, car rien qu'en examinant par exemple l'équation universelle de WISCHMEIER, l'on s'aperçoit combien complexe est le problème et combien nombreux sont les facteurs qui interviennent : seules l'expérimentation et les études sur le terrain peuvent apporter une explication globale et pratique. L'influence des divers couverts sur le bilan de l'eau, sur le ruissellement et par conséquent, sur le régime hydrologique des cours d'eau est une des applications de cette étude, car qui peut soupçonner que les pluies fines et hivernales de la région de la première falaise malgache à 1.000 m d'altitude, entraîneraient la montée insoupçonnée des eaux à l'embouchure des fleuves de la côte Est jusqu'à perturber les trafics sur les bacs ! Or, c'est la réalité même et l'on peut imaginer les effets des pluies torrentielles sur les plateaux dénudés et les graves menaces qui hypothèquent certaines agglomérations comme Tananarive, la capitale, ou certaines régions stratégiquement vitales, comme la cuvette de l'Alaotra, grenier de l'Ile.

Indépendamment de la valeur scientifique et technique de cette publication, les points d'impact pratique la situent à une place méritoire et méritée.

Nous saluons avec joie cette première publication concernant « l'hydrologie forestière » à Madagascar et nous sommes certaines qu'elle contribuera à résoudre une partie de nos problèmes de l'eau et du sol.

Cette étude, certes est le résultat d'observations encore récentes : car si l'hydrologie en général a été abordée depuis une longue date, d'abord par l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar (I. R. S. M.) puis l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O. R. S. T. O. M.) « l'hydrologie forestière » a connu ses débuts en 1962. Mais elle introduit la recherche forestière malgache dans une ère nouvelle : les problèmes de l'influence du couvert végétal nous sont posés et nous seront toujours posés ; les champs d'investigation se multiplient de jour en jour, les études commencées méritent d'être poursuivies.

M. Georges RAMANANTSOAVINA  
Directeur des Eaux et Forêts  
et de la Conservation des sols,  
Madagascar.







*Grands bassins de Périnet. Forêt naturelle d'Ampangalatsary.*

## PRÉAMBULE

Le présent document a pour objet de faire le point d'une manière aussi claire et complète que possible de l'ensemble des expérimentations menées en bassin versant sur l'étude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications entreprises depuis la création du Centre Technique Forestier Tropical Madagascar en 1962.

Il reprend bon nombre de travaux, publiés ou non, réalisés depuis cette date par l'équipe de chercheurs qui s'est penchée sur ces problèmes : B. SOUCHIER, Chef de la Division Sol-Forêt jusqu'en 1964. — J. de VERGNETTE, Ingénieur de recherche à la Division Sol-Forêt de 1963 à 1969. — C. BAILLY, Chef de la Division Sol-Forêt, puis Directeur du C. T. F. T. — G. BENOIT de COGNAC, Ingénieur de recherche, puis Chef de la Division Sol-Forêt. — C. MALVOS, Ingénieur de recherche à la Division Sol-Forêt. — J. M. NINGRE, I. G. R. E. F. ayant

effectué son service national à la Division Sol-Forêt et durant lequel il s'est spécialement occupé de l'exploitation des résultats obtenus sur les bassins de Périnet. — J. M. SARRAILH, Diplômé en écologie de l'Université de Nice, volontaire du service national en 1972-1973 puis assistant à la Division Sol-Forêt qui a rédigé une grande partie de cette mise au point à partir des travaux et documents disponibles.

Les travaux sur le terrain ont été menés sur l'ensemble des Stations depuis le début de l'expérimentation par M. R. HUEBER et M. LEFEBVRE, Techniciens au C. T. F. T. Madagascar. Les observations ont été réalisées sous la direction de MM. Paul JARSON, Agent technique des Eaux et Forêts à Périnet, Jean NDRIAMBARA, Chef observateur à Manankazo et JULIEN RAKOTONDARAMARO à Antanimora.

## INTRODUCTION

Devant les effets catastrophiques de l'érosion, favorisée par la destruction de la couverture végétale, l'importance du problème de l'environnement n'échappe plus guère à personne à Madagascar.

L'agressivité des agents atmosphériques, comme celle de l'homme, amène des transformations irréversibles du biotope, conduisant à la destruction des facteurs de production.

Aussi la Direction Générale des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols et le Centre Technique Forestier Tropical se sont-ils penchés sur ces problèmes afin d'approcher la connaissance de l'érosion à Madagascar pour lutter contre ces

phénomènes par des traitements appropriés. Plusieurs réalisations ont été ainsi effectuées dans quatre zones différentes, très représentatives des principales écologies de Madagascar :

- la zone des Hauts-Plateaux, recouverte d'une steppe à graminées de zone humide d'altitude,
- la zone forestière d'altitude, recouverte d'une forêt tropicale d'altitude,
- la zone sub-aride du Sud, recouverte d'une steppe à graminées dégradée et d'un bush intermittent,
- la zone côtière Nord-Ouest (Befandriana-Nord).

## ZONE DES HAUTS-PLATEAUX

Une opération a été menée pour déterminer dans la région des Hauts-Plateaux les systèmes de mise en valeur susceptibles d'être préconisés connaissant leur relation avec les phénomènes de l'érosion et du ruissellement.

En 1961 une première expérimentation sur parcelles élémentaires de mesure de l'érosion et du ruissellement a été mise en place sur l'emplacement du périmètre forestier de Manankazo sur les tampo-ketsa (1) d'Ankazobe. En 1962 un projet complémentaire portant sur des bassins versants élémentaires permettant la réalisation des travaux agricoles ou forestiers a été installé, financé par le F. A. C. (2).

En 1972, compte tenu des résultats déjà obtenus, et reprenant des demandes faites par la Direction des Eaux et Forêts, un projet d'action concertée « Bassins Versants » a retenu l'attention de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique française et a pu faire l'objet d'une « Aide à la Recherche ». Ce projet d'action concertée est actuellement mené, en liaison avec le Service de la Conservation des Sols de la Direction Générale des Eaux et Forêts, par les divers Instituts de

Recherche appliquée. Le Centre Technique Forestier Tropical (C. T. F. T.), l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (I. R. A. T.), l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale (I. E. M. V. T.) et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.). Une partie des recherches est réalisée à Manankazo, selon un programme qui prévoit la poursuite des expérimentations déjà en place avec renforcement des actions sur les points ci-après :

- étude de la variation du taux d'humidité du sol selon les divers couverts,
- étude du drainage vertical (lysimètre simplifié),
- étude de l'évolution du profil cultural en fonction des traitements et étude de ses relations avec le bilan de l'eau,
- étude de l'évapotranspiration,
- étude de l'évolution naturelle de la végétation herbacée,
- mise en place de parcelles élémentaires pour étude de l'évolution tant du point de vue sol et ruissellement que composition floristique.

## ZONE DE FORÊT TROPICALE D'ALTITUDE

En projet dès 1961, l'étude du ruissellement et de l'érosion à Périnet-Analamazaotra a effectivement commencé en 1962, à la suite de la Convention F. A. C. n° 39-C/60/N passée entre le Gouvernement Malgache et le Centre Technique Forestier Tropical pour « l'exécution des travaux d'infrastructure nécessaires à l'étude des lois de l'écoulement et

de l'érosion sur bassins versants expérimentaux à Périnet ».

Les observations, qui ont essentiellement pour objet l'étude de l'influence du couvert sur le ruissellement et le bilan de l'eau, ont été réalisées sur sept bassins versants, à savoir :

- quatre sous forêt naturelle (bassin d'Ampangalatsary),
- un sous peuplement d'Eucalyptus (bassin de Betsakotsako),

(1) Plateaux d'altitude.

(2) F. A. C. : Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française.



*Grands bassins de Périnet. Pluviomètre à Betsakotsako (Eucalyptus).*

— deux sous brulis (tavy) retournant vers une végétation arbustive secondaire (savoka) (bassins de Marolaona).

La superficie de ces bassins varie de 7,14 à un peu plus de 100 ha.

La Convention F. A. C. 19/C/61/N avait pour objet la poursuite des mesures de ruissellement et

de l'érosion entreprises sur les bassins versants expérimentaux et prévoyait l'installation, sur le bassin versant de Marolaona de trois bassins versants élémentaires pour tester l'influence des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion. L'ensemble de ces bassins a fait l'objet depuis 1963 de mesures suivies, réalisées par le C. T. F. T. sur son programme de recherche.

## ZONE SUB-ARIDE DU SUD DE MADAGASCAR (ANTANIMORA)

La région Sud de Madagascar est très aride et de ce fait très deshéritée en points d'eau permanents. Cette situation pose un problème ardu pour l'alimentation en eau des humains et des troupeaux ceux-ci étant parfois obligés de parcourir, chaque jour, des distances importantes pour s'abreuver.

L'étude réalisée dans cette région à Antanimora à la demande du Service des Eaux et Forêts et sur des crédits du Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française, avait pour but, après l'aménagement d'un bassin élémentaire suivant les techniques de Conservation de l'Eau et du Sol, de suivre sur ce bassin :

- la régénération du pâturage dégradé ;

— la régularisation du débit par réduction des pointes de crue et du ruissellement ;

— le stockage de l'eau dans les terrains perméables ;

Un second bassin situé à proximité du premier fut choisi pour servir de témoin.

Ces deux bassins :

— Tsimandaha, aménagé, 155 ha ;

— Ianamalora, témoin, 185 ha, furent étudiés pendant 5 campagnes consécutives et la présente note reprend l'ensemble des résultats obtenus afin d'essayer d'en tirer les conclusions utiles à l'aménagement de ces régions.

## ZONE CÔTIÈRE NORD-OUEST (BEFANDRIANA-NORD)

Les régions côtières de l'Ouest de Madagascar ont en général des potentialités agricoles importantes et une pluviométrie abondante mais cette dernière est très irrégulière et surtout présente une agressivité peu commune. Il s'y pose donc un problème de régularisation du régime hydrique et c'est dans cette optique que le Gouvernement Malgache a demandé au C. T. F. T. d'installer un dispositif de mesure du bilan de l'eau dans la région de BEFANDRIANA-NORD. Cette étude, qui s'est intégrée dans l'Opération de Développement Rural BEFANDRIANA-MANDRITSARA, a fait l'objet d'une première Convention F. A. C. n° 21-C/67/N/2 pour les travaux d'installation et les deux premières campagnes de mesures et d'une seconde, n° 1/71/N pour les deux dernières campagnes.

Contrairement aux précédentes études qui ont

consisté à comparer plusieurs bassins sous différents couverts, celle-ci ne se proposait que d'établir un bilan sur un seul bassin en vue de déterminer les possibilités d'utilisation de petites retenues pour la régularisation du régime hydrique en vue de l'utilisation de l'eau pour les besoins agricoles.

Le bassin versant étudié (Andranomanintsy) a une superficie de 25 ha et débouche dans une petite retenue collinaire de 1 ha environ. Les observations ont été réalisées de juillet 1968 à juin 1972 et elles ont porté sur :

- la pluviométrie (quantité, intensité, etc...).
- le débit du déversoir de crue,
- le débit permanent hors-crue,
- le débit des vannes d'irrigation,
- les variations du volume de la retenue.

## DESCRIPTIONS DES EXPÉRIMENTATIONS EFFECTUÉES

### ZONE DES HAUTS-PLATEAUX — MANANKAZO

#### DESCRIPTION DU MILIEU.

Les points d'expérimentation du C. T. F. T. sont installés dans l'aménagement test de Manankazo, lui-même faisant partie du périmètre de la station forestière d'une superficie de 10.000 ha. Il est envisagé sur ce périmètre la réalisation d'un reboisement en résineux. La station forestière est à environ 125 km de Tananarive sur la route Nationale 4 Tana-Majunga (voir plan de situation joint et plan de l'aménagement test).

L'ensemble des terrains est à une altitude de 1.500 à 1.600 m et se présente sous forme de plateaux plus ou moins ondulés (tampoketsa). La couverture naturelle actuelle est essentiellement constituée par une steppe à graminées plus ou moins fournie selon l'état de dégradation. Cette steppe est à base de *Loudelia stipoides* avec *Aristida multicaulis* d'autant plus fréquent que la pente et la dégradation sont plus accusées. Dans les bas-fonds on trouve des marais généralement assez pentus constitués sur tourbe plus ou moins profonde et toujours peu évoluée. Dans les têtes de thalwegs persistent fréquemment des reliques forestières à caractère « forêt de l'Est » dont l'importance va en diminuant d'Est en Ouest. L'importance et le rôle de ces reliques sont loin d'être négligeables.

L'ensemble de ces terrains est parcouru par des feux non contrôlés dont l'action sur la dégradation de la couverture végétale est certaine.

Le substrat géologique est constitué par une lame très épaisse de granite migmatitique dans la série gneissique disparaissant à l'Est sous les schistes cristallins de la vallée de la Betsiboka, à l'Ouest sous la série du graphite.

Du point de vue pédologique nous renvoyons pour le détail à l'étude de reconnaissance pédologique réalisée par l'Institut de Recherches Agronomiques de Madagascar (I. R. A. M.) (Document I. R. A. M. n° 87 par F. THIBOUT 1966). En général ces sols de tanety sont des sols ferrallitiques brun-jaune lessivés avec un horizon humifère plus ou moins important et une grande pauvreté en acide phosphorique assimilable et en bases échangeables.

Le tableau n° 1 donne les résultats d'analyse du

sol (prélèvements d'échantillon sur les quatre bassins versants) ainsi que les mesures de perméabilité (méthode HENIN).

Ces analyses indiquent :

- un pH acide ;
- une teneur en matière organique élevée caractéristique de ces sols tropicaux d'altitude ;
- une pauvreté générale en acide phosphorique assimilable et en bases échangeables ;
- une capacité d'échange faible.

Un essai en vase de végétation a été réalisé lors de la reconnaissance de M. THIBOUT (V. V. 101) à partir d'un échantillon représentatif des sols typiques sous prairie, riches en matière organique.

Le tableau n° 2 mentionne le pourcentage des récoltes, par rapport à la quantité de matière sèche obtenue avec fumure complète (fig. 2).

Une carence grave en phosphore se manifeste dès la première coupe, puisque le rendement des pots privés de cet élément avoisine le 1/3 de celui des pots à fumure complète. Elle est encore plus accusée dans les coupes suivantes.

Les autres carences se manifestent moins fortement à la première coupe, mais les rendements se réduisent à partir de la deuxième coupe sur les pots privés de K, Ca, Mg et S.

Par conséquent, mis à part le traitement privé d'oligo-éléments, les rendements de matière sèche, sur les 4 coupes de ray-grass, indiquent des déficiences en éléments minéraux. On peut ainsi classer la gravité des carences en fonction du pourcentage de la fumure complète.

Fumure complète	100
— moins P	23,1
— moins K	48,2
— moins S	63,1
— moins Ca	66,5
— moins Mg	68,3
— moins O. E.	93,0

On constate donc : une carence grave en phosphore, une carence nette en potassium, des carences secondaires en soufre, calcium, magnésium.

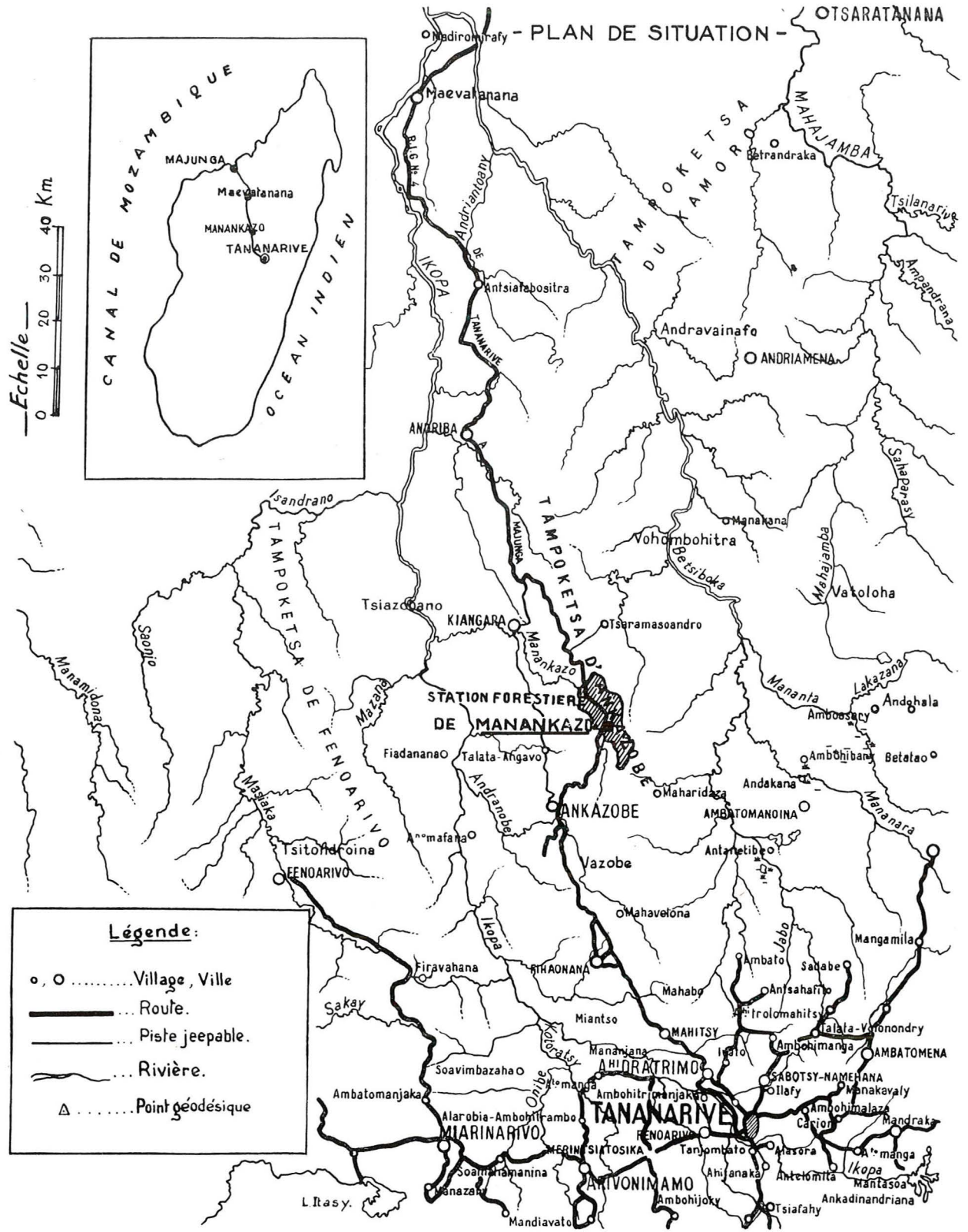
TABLEAU N° 1. — PRÉLÈVEMENT SUR LES QUATRE BASSINS VERSANTS DE MANANKAZO

Date : 27.4.62 (N° 4 à 8) 3.7.62 (N° 9)

N° du B. V. et situation	B. V. 1 Témoïn	B. V. 2 Cultures				B. V. 3 Prai. brûl.	B. V. 4 reboisement			
		Sommet	mi-pente		Exut.					
N° échantillon .....	0	4	5	5	6	7	9	9	9	
N° profil .....	1	1	1	2	1	1	1	2	3	
Profondeur du prélèvement.....	0,15	0,15	0,15	40	0,25	0,10	0,12	35,70	110/130	
P. H. ....	4,9	4,7	4,8	5 2	5,1	4,8	5,0	5,5	5,6	
Humid. % { PF 2,8 .....	31,2	31,0	33,2	23 7	31,6	30,4				
	terre sèche { PF 4,2 .....	22,6	23,7	21,8	17,5	21,2	18,3	22 8	19,4	19,8
Perméabilité m/s .....	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	
	3,7	2,3	2,5	1,4	1,5	1,7	1,8	1,3	1,3	
Stabilité { Log. 10 K .....	2,127	1,929	1 964	1,707	1,756	1,799	1,813	1,699	1,672	
	structure { Log. 10 IS .....	1,520	1,221	1,583	0,975	1 880	1,687	0,611	1,158	1,199
	Σ	2,54	2,65	2,49	1,70	2,26	2,37	1,92	1,61	1,57
Eaux % Echant.....	2,30	1,08	1,53	1,02	2,02	2,29				
Sable grossier % .....	18,48	25,05	21 63	20,0	24,19	23,50				
Sable fin % .....	2 64	2,02	2 80	1,60	2,80	3,19				
Sable très fin % .....	1,8	1,8	2,4	4,6	2 5	1,3				
Limon % .....	18,1	13 8	15,1	11,1	13,1	10,7				
Argile %.....	45 6	44,1	46 8	57,9	44 1	49,3				
Mat. organ. % .....	10,79	12 54	10,98	4,67	12,34	9,91	11,01	3,97	3,97	
Carbone % W. B. ....	6,25	7,26	6,36	2,71	7,15	5,74	6,38	2,30	2 30	
Azote ‰ .....	3,12	3,68	3,48	1,24	3,32	2 80	2 52	1,20	0 68	
Rapport C/N .....	20	20	18	22	22	20	25	19	34	
P2O5 assim { Truog .....	0,025	0,025	0,025	0,025	0,019	0,019				
	%o Duch. ....	0,112	0,640	0 136	0,124	0,082	0,082			
CaO ‰o .....	0,054	0 054	0,054	0,054	0,064	0,041	0,027	0,079	0,013	
MgO ‰o .....	0 045	0,056	0,056	0,056	0,056	0,034	0,021	0,015	0,015	
K2O ‰o .....	0,040	0 056	0,032	0,016	0,052	0,044	0 030	0,006	0,004	
N2O ‰o .....	0,008	0,012	0,008	0,010	0,020	0,012	0	0,003	0,007	

TABLEAU N° 2

Traitement	Première coupe	Deuxième coupe	Troisième coupe	Quatrième coupe
Fumure complète .....	100	100	100	100
Fumure complète moins P .....	30,15	18,45	11,29	24,37
Fumure complète moins K .....	72,08	40,26	11,48	26,65
Fumure complète moins Ca .....	77,36	63,4	48,5	57,87
Fumure complète moins Mg .....	93,88	66,25	30,25	25,96
Fumure complète moins S .....	82,17	59,35	36,64	34,73
Fumure complète moins O. E. ....	100,33	89,05	85,29	85,15





**ESSAI VV101-*Recherche de carences sur sol ferrallitique sous prairie***  
**MANANKAZO**

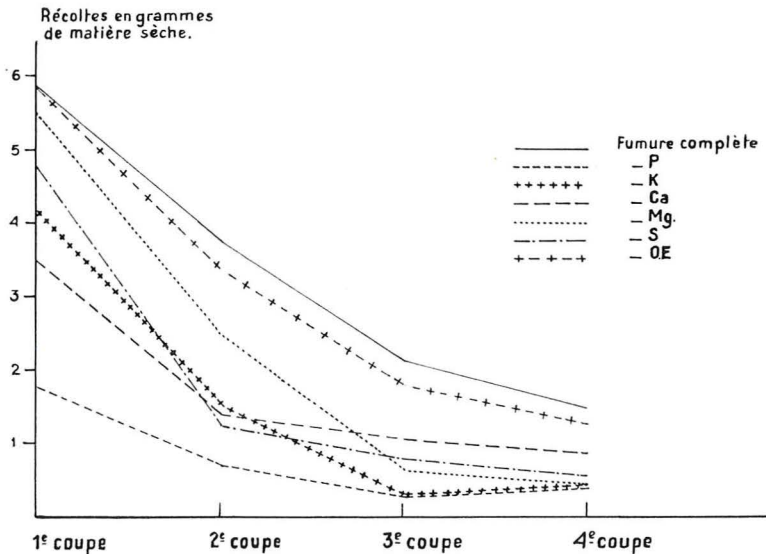
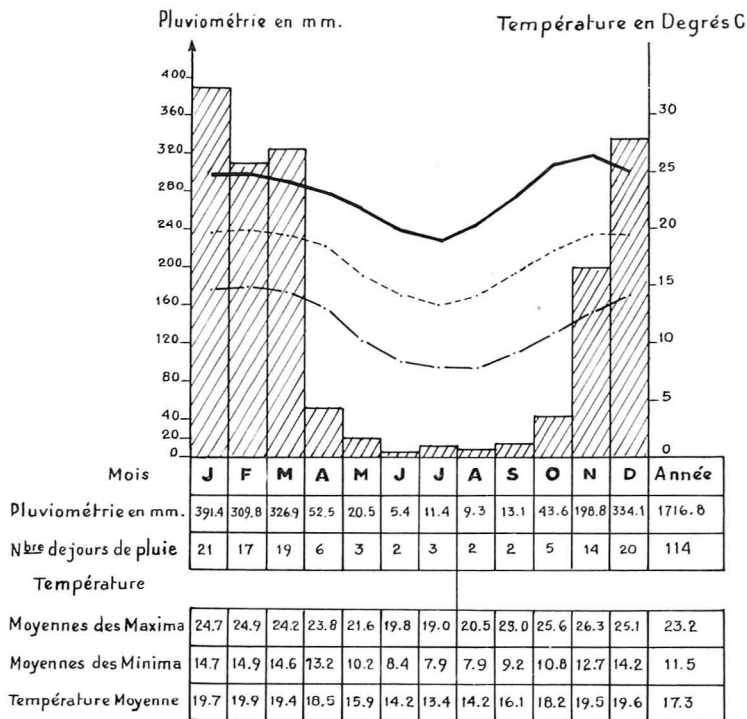


FIG. 2.

**STATION DE MANANKAZO**  
**Observations Climatologiques**

Alt. : 1475 m.  
 Lat. : 18°10'  
 Long. : 47°13'



Pluviométrie de 1948 à 1967.  
 Température de 1954 à 1967.  
 Moyennes des Maxima : ———  
 Moyennes des Minima : - - - - -  
 Température Moyenne : ······  
 (D'après Documents du Service Météo)

FIG. 3.

Au point de vue climatologique cette région se caractérise par :

- une pluviométrie annuelle moyenne de 1.700 mm/an concentrée sur cinq mois avec une saison sèche marquée et une grande variabilité d'une année à l'autre ;
- une influence importante des alizés indiens, vents dominants de l'Est qui soufflent fréquemment ;
- une saison fraîche marquée avec des minima assez bas en juillet-août (Voir graphique ci-contre).

**DISPOSITIFS MIS EN PLACE.**

Plusieurs portions de terrains aussi proches l'une de l'autre et aussi voisines que possible au point de vue topographie, orientation, forme, sol ont été choisies. Le relief particulier de la région a permis de trouver 4 bassins élémentaires ayant une forme voisine classique en entonnoir. On a ainsi pu limiter les coûts des travaux nécessaires à l'isolement des côtés des champs expérimentaux. A la partie inférieure grâce à une gouttière collectrice constituée par des tôles enfoncées dans le sol et se terminant par une murette en béton il a été possible de concentrer les eaux dans un canal d'écoulement. Ce canal d'écoulement est précédé d'une cuve de sédiments de 5 m x 3 x 0,40 comportant une grille à grosses mailles.

Le flotteur est installé dans un puits situé sur l'aile d'un déversoir calibré terminant le canal d'écoulement d'une longueur de 3m et d'une largeur de 1,45 m.

Les cotes du déversoir et ses spécifications sont données dans le croquis joint en annexe. Ce type de canal calibré avec déversoir en V est utilisé fréquemment aux U. S. A. par le Soil Conservation Service (Cf. Field Manual for research in agricultural hydrology Agricultural Handbook, n° 224. juin 1962) et est connu sous le nom de déversoir type H. Ce canal a été étudié et conçu par le « laboratoire d'hydraulique du Bureau National des Standards » pour le Soil Conservation Service des U. S. A. qui en a réalisé l'étalonnage expérimental (Annexe n° 1, fig. n° 81 et 82).

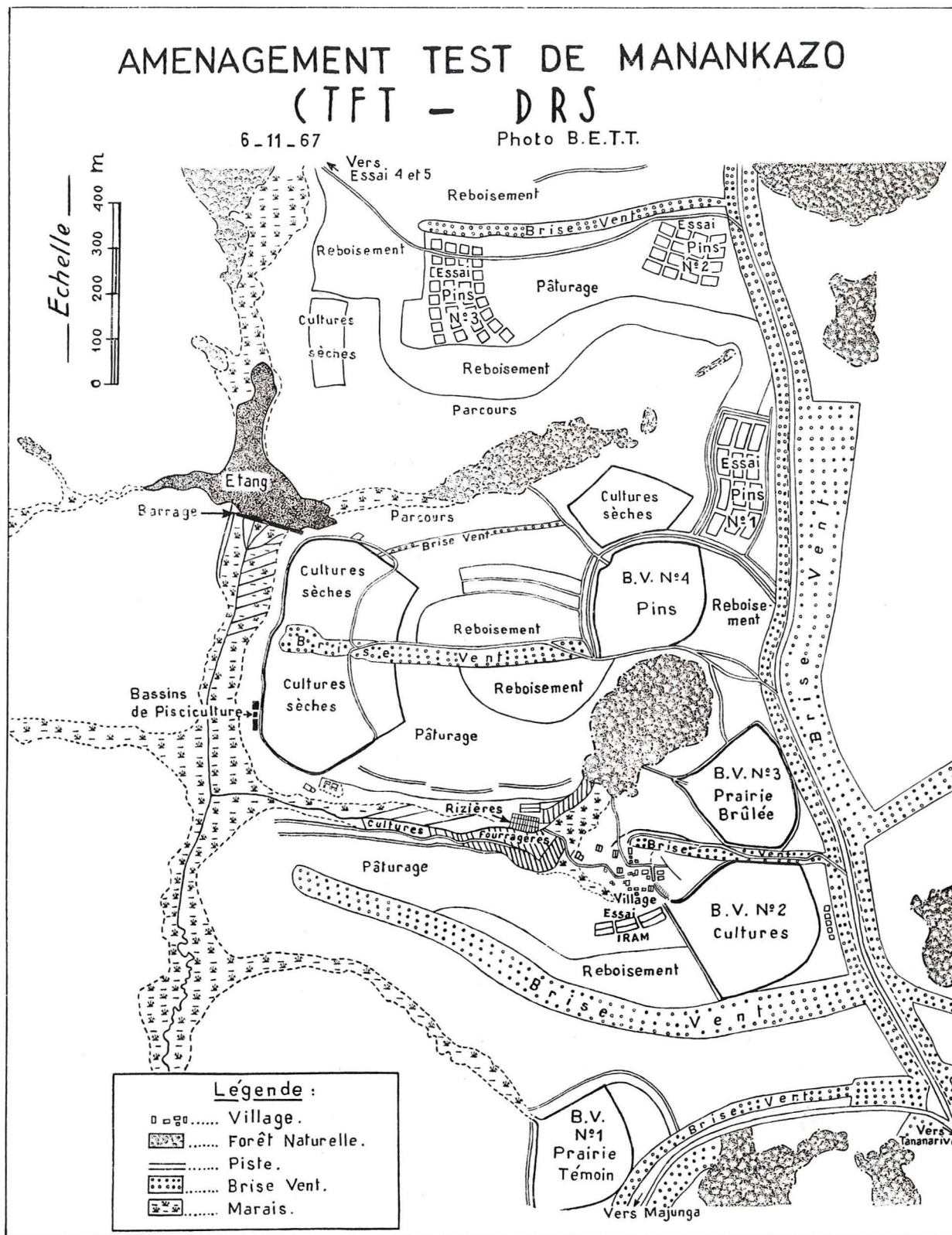


FIG. 4.

Le limnigraphe utilisé pour équiper ces déversoirs est un limnigraphe à tambour journalier à

réduction 1/2 RICHARD, type NG/5.145. A partir de décembre 1963 la réduction utilisée a été le 1/3.

Les aménagements des 4 bassins sont les suivants :

**Bassin n° 1** : *Superficie* : 3, 18 ha.

C'est le bassin témoin laissé en l'état sous couverture naturelle graminéenne de *Loudelia stipoides*. Ce couvert a évolué vers la prairie dense avec envahissement sporadique par des espèces buissonnantes.

**Bassin n° 2** : *Superficie* : 4,77 ha.

Il a été aménagé en culture en courbes isohypses avec dispositifs anti-érosifs appropriés. Un assolement sur 7 ans a été suivi depuis l'origine. Cet assolement comprend 4 années de cultures (Pomme de Terre, Maïs, Légumineuse, Maïs) et 3 années de prairie artificielle (*Melinis minutiflora*, *Chloris, gayana* ou *Brachiaria brizantha*).

A la suite des résultats obtenus en vase de végétation et des essais agronomiques on a retenu la fumure de redressement suivante :

150 U. F.  $P_2O_5$  hyperphosphate,  
180 U. F.  $K_2O$  chlorure de potassium,  
2 t/ha dolomie.

Citons pour exemple quelques résultats obtenus en 1970-71 :

*Les Pommes de Terre*. Variété blanche de France.

Des rendements moyens de 102 q/ha (avec pointe de 160) ont été obtenus

*Le Maïs*. Avec la variété SR 52, maïs rhodésien blanc, les rendements moyens ont été de 50 q/ha avec des maxima de 77 q/ha.

Avec la variété maïs jaune locale les rendements sont de 31 q/ha avec des maxima de 61 q/ha

*Le Soja* graine, a un rendement de 21 q/ha et en fourrage il est de 120 q/ha.

*Le Melinis* produit en 2<sup>e</sup> année en vert 21 t/ha et en 3<sup>e</sup> année 9 t/ha.

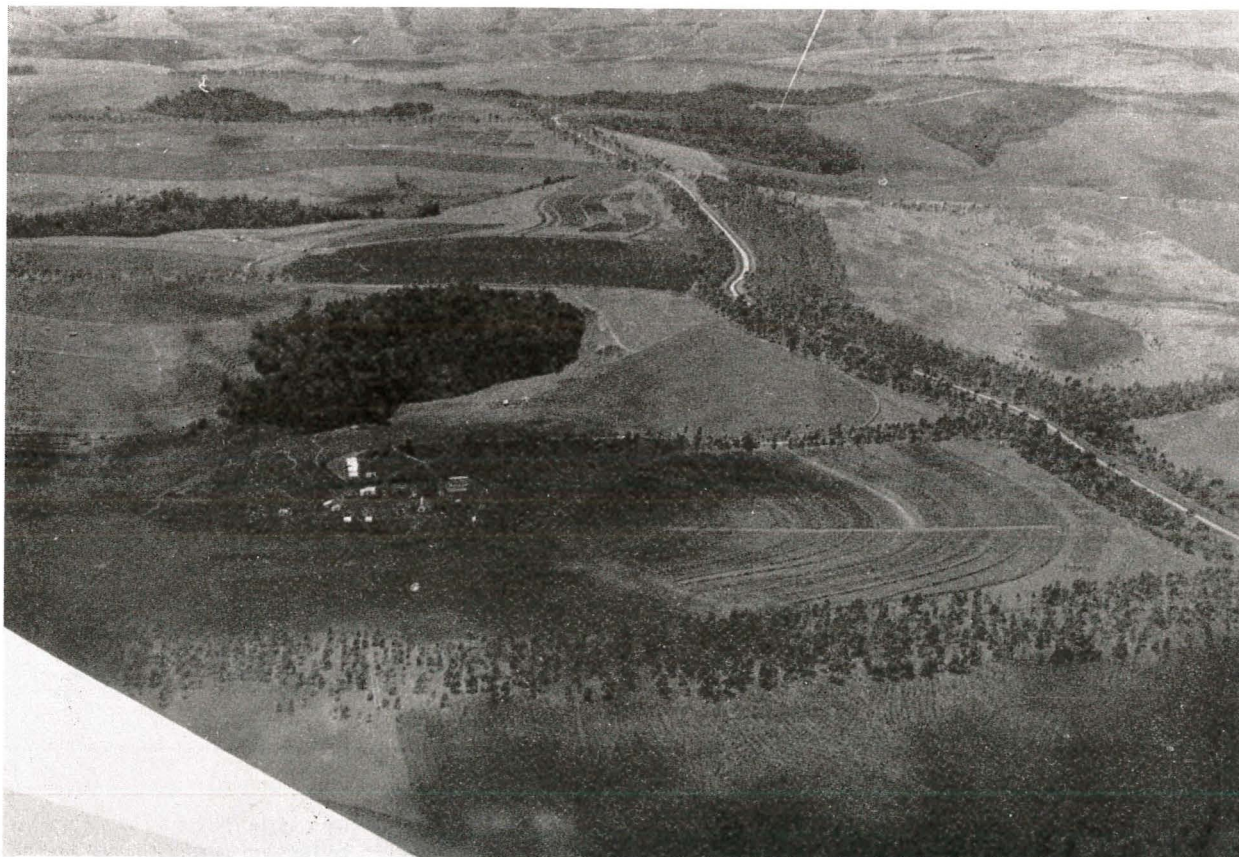
**Bassin n° 3** : *Superficie* : 3,25 ha.

Ce bassin, resté sous prairie naturelle, a été brûlé suivant la méthode traditionnelle de « régénération » du pâturage, une fois tous les deux ans, c'est-à-dire en octobre 1962, 1964 et 1966. En 1968, la dégradation du couvert était telle que les brûlis ont été interrompus.

**Bassin n° 4** : *Superficie* : 3,90 ha.

A été reboisé en 1963 en *Pinus patula*. La plantation a été réalisée sur billons isohypses préalablement sous-solés à 40 cm de profondeur environ (sous-solage + billonnage) avec une densité de 2.000 arbres à l'hectare. Les plants ont reçu une

*Aménagements à Manankazo. Vue de 3 des 4 bassins.*





*Aménagements à Manankazo. Sur le bassin 4, reboisement en Pinus patula.*

petite fumure de départ (50 g d'hyperphosphate, 20 g de sulfate de K, 50 g de dolomie et 10 g de perlurée) dans le potet de plantation.

#### RÉALISATION DES MESURES.

Deux observateurs aidés de deux aides sont chargés de suivre les quatre bassins élémentaires.

En ce qui concerne les précipitations, les diagrammes des pluviographes enregistreurs sont changés quotidiennement dans le cas des appareils à déroulement journalier, ou bien l'heure est notée dans le cas des appareils à table de déroulement. Les pluviomètres sont relevés et les résultats sont consignés dans un cahier spécial.

Chaque jour également les limnigraphes sont équipés d'une nouvelle feuille et le contrôle de la concordance des temps est réalisé par l'observateur qui dispose d'une montre de référence. Si une précipitation entraînant un ruissellement survient, les observateurs et les aides se rendent chacun sur un

déversoir et au cours de la crue vérifient le bon fonctionnement du limnigraphe en reportant sur le diagramme les heures et les hauteurs d'eau lues sur l'échelle de crue.

Au cours de la crue, et autant que faire se peut, des prélèvements d'eau sont réalisés à la bouteille et des contrôles de débit sont réalisés à l'aide d'un jaugeage volumétrique. Ces contrôles sont reportés sur des cahiers spéciaux de mesure.

A la fin de la crue si des transports solides importants ont eu lieu les dépôts sont mesurés et la cuve à sédiments vidangée. Si les dépôts sont faibles la vidange et la mesure englobent plusieurs crues.

Lors de la première campagne (1962-63) quelques crues du début de la saison n'ont pu être saisies par suite d'incidents mécaniques divers ; par la suite les observations ont donné toute satisfaction.

Le report de toutes ces données est réalisé sur des cahiers spéciaux.

## ZONE DE FORÊT TROPICALE D'ALTITUDE

#### DESCRIPTION DU MILIEU.

La station forestière d'Analamazaotra se trouve sur la route menant de Tananarive à Tamatave, à

environ 140 km de Tananarive ; à peu près au sommet de ce qu'on appelle la « falaise Betsimisaraka ». L'altitude varie entre 930 et 1.095 m environ, du centre de la station au point le plus

**STATION D'ANALAMAZAOTRA**  
Observations Climatologiques

Alt: 928 m  
Lat: 18°56'  
Long: 48°24'

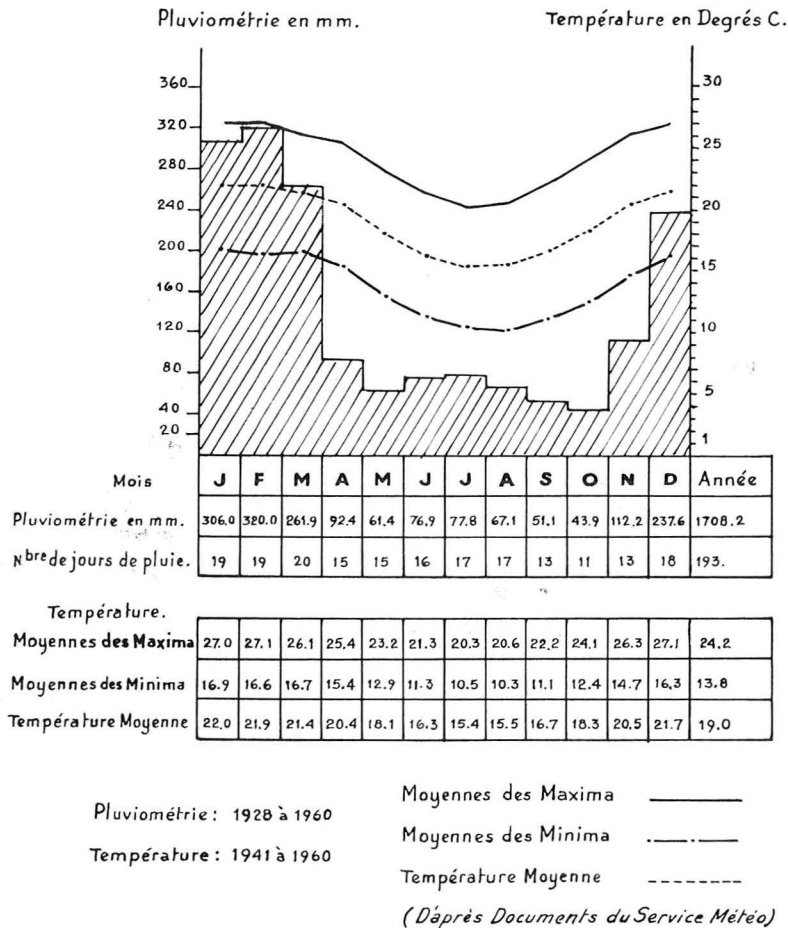


FIG. 5.

élevé des bassins versants étudiés. Le relief est très irrégulièrement ondulé et forme un paysage de moyennes collines.

Le climat est typiquement celui de la côte Est, pluvieux (près de 200 jours de pluie par an) mais avec des tendances un peu plus froides (minimum absolu relevé depuis 1933 : — 5,3 °C). La pluviométrie est de l'ordre de 1.700 mm, mais elle peut varier de façon importante en fonction de la localisation (relief, exposition) puisque l'on a mesuré entre 1963 et 1972 une moyenne de 2.114 mm sur l'un de nos bassins versants (B. V. 2, forêt naturelle) et 1.615 mm sur un autre (B. V. 5, forêt d'*Eucalyptus*) soit 500 mm de différence.

On a l'habitude de distinguer deux saisons, qui ne s'opposent que par la température et le type des précipitations :

— saison chaude, commençant en septembre et se terminant en avril-mai, où les pluies tombent sous la forme d'orages violents, survenant fréquem-

ment en fin d'après-midi, ou sous la forme de pluies cycloniques de longue durée (souvent plus d'une journée). Ces cyclones viennent généralement de l'Est ou du Sud-Est ;

— saison fraîche où les pluies sont fines, de longue durée, les brouillards épais et les nuits froides.

La figure n° 5 résume les principales caractéristiques du climat relevées à la station forestière d'Analamaotra. On y a ajouté le climogramme de Taylor où sont représentées les températures moyennes mensuelles en fonction des précipitations dans les quatre stations d'expérimentation de cette étude (fig. 6). On en conclut que Périnet se caractérise par l'absence de mois physiologiquement sec, une amplitude thermique faible, une saison pluvieuse très marquée. Le mois le plus arrosé est février, mais il y a une deuxième petite saison des pluies vers le mois de juillet.

Du point de vue sol la roche-mère est un gneiss à muscovite, biotite, amphibole, pyroxène (1). Ces minéraux seraient répartis de façon non homogène, en filons, ce qui expliquerait des différences sensibles observées dans les résultats d'analyses du sol. Ce sol est cependant toujours un sol ferrallitique sablo-argileux et on observe d'une façon générale le profil suivant :

A0 : litière, épaisse sous forêt naturelle (5 à 7 cm) constituée de feuilles peu décomposées et d'un feutrage très dense de racicules, moins épaisse ailleurs (1 à 2 cm).

A1 : horizon humifère de structure assez grumeleuse, épaisseur variant de 10 cm (B. V. déboisé de Marolaona) à 30 cm au maximum (sous forêt naturelle), de couleur brunâtre.

B1 : horizon plus clair, de couleur tirant vers le jaune foncé et passant progressivement, vers 60 cm en moyenne à B2.

B2 : argile ferrallitique de couleur rouge, structure polyédrique, agrégats à face luisante (« clay-skin »), puis B3 et enfin C, vers — 2-3 m : argile limoneuse, de cohésion faible, de couleur rouge violacé.

(1) D'après J. RIQUIER (Etude d'un sol de tavy et d'un sol de forêt primaire à Périnet, Mémoire de l'Institut Scientifique de Madagascar, Série D, Tome V, 1963).

FIG. 6.

L'épaisseur de la « roche-mère » C peut être considérable.

Ce type de sol est classiquement appelé « sol ferrallitique jaune sur rouge ».

On trouve ci-après (p. 18) un tableau donnant les résultats d'analyses chimiques du sol (moyenne de huit prélèvements annuels effectués de 1962 à 1970). De ce tableau se dégagent les caractéristiques suivantes :

- sol acide fortement désaturé,
- minéralisation de la matière organique lente (rapport C/N élevé) expliquant un taux de matière organique fort,
- granulométrie équilibrée,
- sol pauvre en  $P_2O_5$ .

Des mesures de perméabilité ont été effectuées en avril 1963 en utilisant la méthode MUNTZ ; on note la quantité d'eau versée toutes les cinq minutes (ou moins si l'infiltration est rapide) dans un tube d'une section de 100 cm<sup>2</sup> enfoncé dans le sol. Il semblerait que le sol superficiel soit très perméable (perméabilité de l'ordre de 12 mm par minute pour Ampangalatsary avec un sol saturé d'eau, 2 mm/mn pour Marolaona, 3 à 4 mm/mn pour Betsakotsako), par contre, au-delà de 30 cm le sol serait presque imperméable (voir fig. 7).

Nous ne décrivons que très sommairement le couvert végétal.

• La forêt naturelle présente l'aspect général d'une futaie jardinée, mais où le nombre des essences est immense. C'est l'aspect typique de la forêt Malgache de l'Est (forêt dense ombrophile de moyenne altitude), où les arbres n'atteignent pas des dimensions considérables (d'autant qu'une exploitation a eu lieu une cinquantaine d'années auparavant) et où les plantes épiphytes et les fougères, notamment arborescentes, sont abondantes. Parmi les arbres les plus fréquemment rencontrés, citons le Varongy (*Ocotea*

FIG. 7.

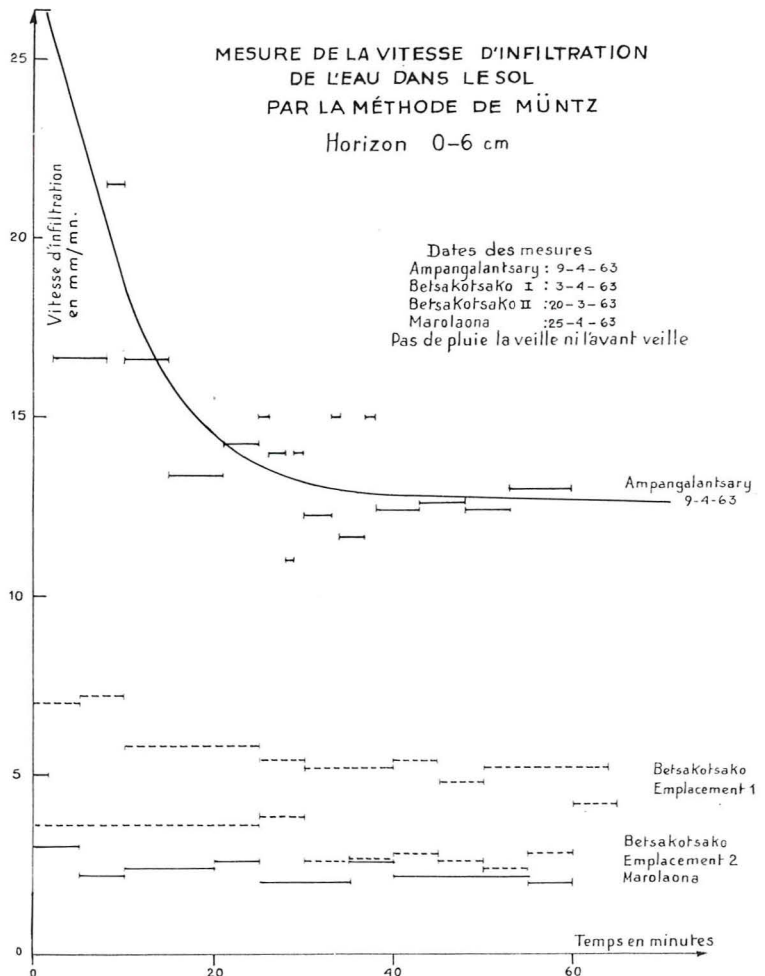
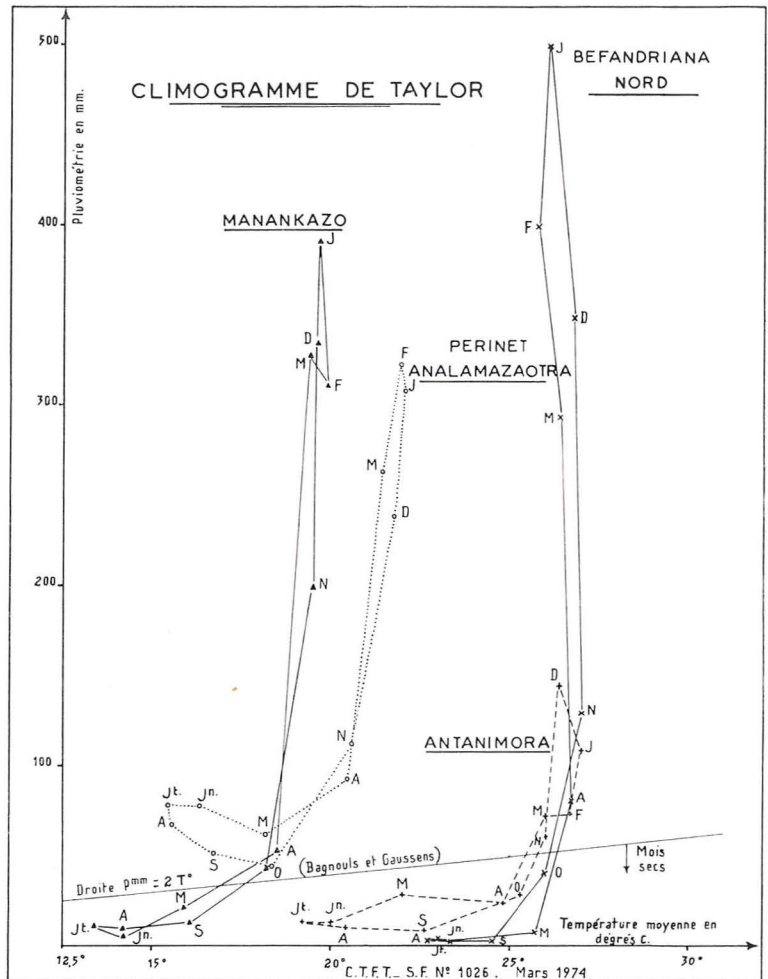


TABLEAU N° 3

## ANALYSE DES SOLS DE PERINET

Moyenne des analyses effectuées par le C. T. F. T. pendant huit années de 1962/63 à 1970/71.  
(Campagne 1963/64 : Pas de résultats)

Lieu de prélèvement	Profondeur cm	pH	Granulométrie (%)					M. O. %	C ‰	N ‰	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Truog ‰	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Duch ‰	Bases échangeables					Capacité	Degré saturat.
			SG	SF	STF	L	A							CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S		
Parcelle 1	0-5	4,83	27,1	12,5	2,8	11,9	29,7	12,5	7,2	3,70	19,6	0,039	0,708	0,434	0,176	0,142	0,033	2,8	16,5	17,0
	10,20	4,79	24,1	14,1	4,2	15,2	31,0	8,1	4,7	2,52	18,7	0,017	0,504	0,057	0,050	0,072	0,018	0,6	10,6	5,8
Parcelle 2	0-5	5,07	32,6	12,0	2,5	12,2	28,1	9,1	5,2	2,74	19,1	0,025	0,445	0,575	0,167	0,096	0,022	3,1	11,4	28,2
	10,20	4,77	29,5	13,4	3,6	13,3	29,2	7,3	4,2	2,35	17,8	0,022	0,502	0,178	0,072	0,053	0,021	1,2	9,3	15,0
Parcelle 3	0-5	4,32	34,7	9,3	4,1	14,1	25,9	10,0	5,7	3,04	18,5	0,062	0,712	0,130	0,121	0,124	0,032	1,4	10,2	15,0
	10,20	4,39	32,1	9,5	5,3	12,7	30,6	6,5	3,7	2,19	16,8	0,026	0,532	0,141	0,048	0,085	0,024	0,8	7,7	13,6
Parcelle 4	0-5	4,11	30,1	9,0	2,5	15,8	23,2	15,4	8,9	4,63	19,1	0,061	0,548	0,085	0,063	0,101	0,034	1,01	15,3	6,0
	10,20	4,30	25,3	9,5	3,2	15,6	30,7	9,1	5,2	2,79	18,8	0,041	0,474	0,035	0,022	0,059	0,020	0,375	10,6	3,5

Localisation des parcelles : parcelle 1 : à Marolaona, sous vieille savoka,  
parcelle 2 : — sous jeune savoka,  
parcelle 3 : à Ampangalatsary sous forêt naturelle,  
parcelle 4 : à Betsakotsako sous Eucalyptus.

Remarques : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> TRUOG : il s'agit du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> lié au calcium.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> DUCHAUFOR : il s'agit du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> lié au fer et à l'alumine.

Les bases échangeables sont données en ‰ sauf leur somme S qui est en mEq. Capacité d'échange en mEq également.

Degré de saturation en %.

sp.), le Tavolo (*Ravensara* sp.), le Famelona (*Gambeya boiviniana*) et le Rotra (*Eugenia* sp.).

• Le peuplement d'*Eucalyptus robusta* a été planté vers 1914 sur un brûlis suivi d'une culture de manioc pendant quelques années ; il a ensuite été traité en éclaircies jusqu'à la date du début des observations (1962) et les *Eucalyptus* exploités ont ensuite rejeté. L'aspect est celui d'une haute futaie où les tiges sont de diamètres très variés, les arbres les plus hauts atteignent environ 45 m. Le sous-bois est abondant et comprend des espèces de la forêt naturelle (parmi lesquelles par exemple, dans les zones humides, des *Pandanus* et des fougères arborescentes).

• La brousse secondaire (savoka) succédant au brûlis (tavy) est formée d'une végétation d'abord buissonnante ; puis arbustive très dense, peu pénétrable, où l'on trouve surtout des fougères (notamment *Pteridium aquilinum*), du Dingadin-gana (*Psidia allissima*), de la Corbeille-d'or, ou Radriaka (*Lantana camara*), et ça et là, premier arbre de la forêt naturelle à se réinstaller, l'Haron-gana (*Harungana paniculata*).

## DISPOSITIF MIS EN PLACE.

### Bassins comparatifs.

Nous ne parlerons que des mesures ayant pour objet l'évaluation du débit à l'exutoire des bassins versants ou de la pluviométrie. Des appareils de mesure de l'humidité du sol (sonde à plâtre) ont aussi été installés, mais leur fonctionnement a été irrégulier et les observations n'ont pas été poursuivies.

— Station d'Ampangalatsary (sous forêt naturelle).

Elle est constituée d'un grand bassin versant appelé B. V. 4 dans lequel on a délimité trois bassins secondaires. Le grand bassin a une forme assez allongée, le thalweg étant orienté à peu près vers l'Ouest-Nord-Ouest, les trois plus petits bassins sont adjacents et couvrent la partie supérieure du bassin B. V. 4, le B. V. 3 incluant lui-même le B. V. 2.

Les pentes sont à peu près symétriques de part et d'autre du thalweg principal et assez fortes (jusqu'à 55 %). L'ensemble est très ondulé.

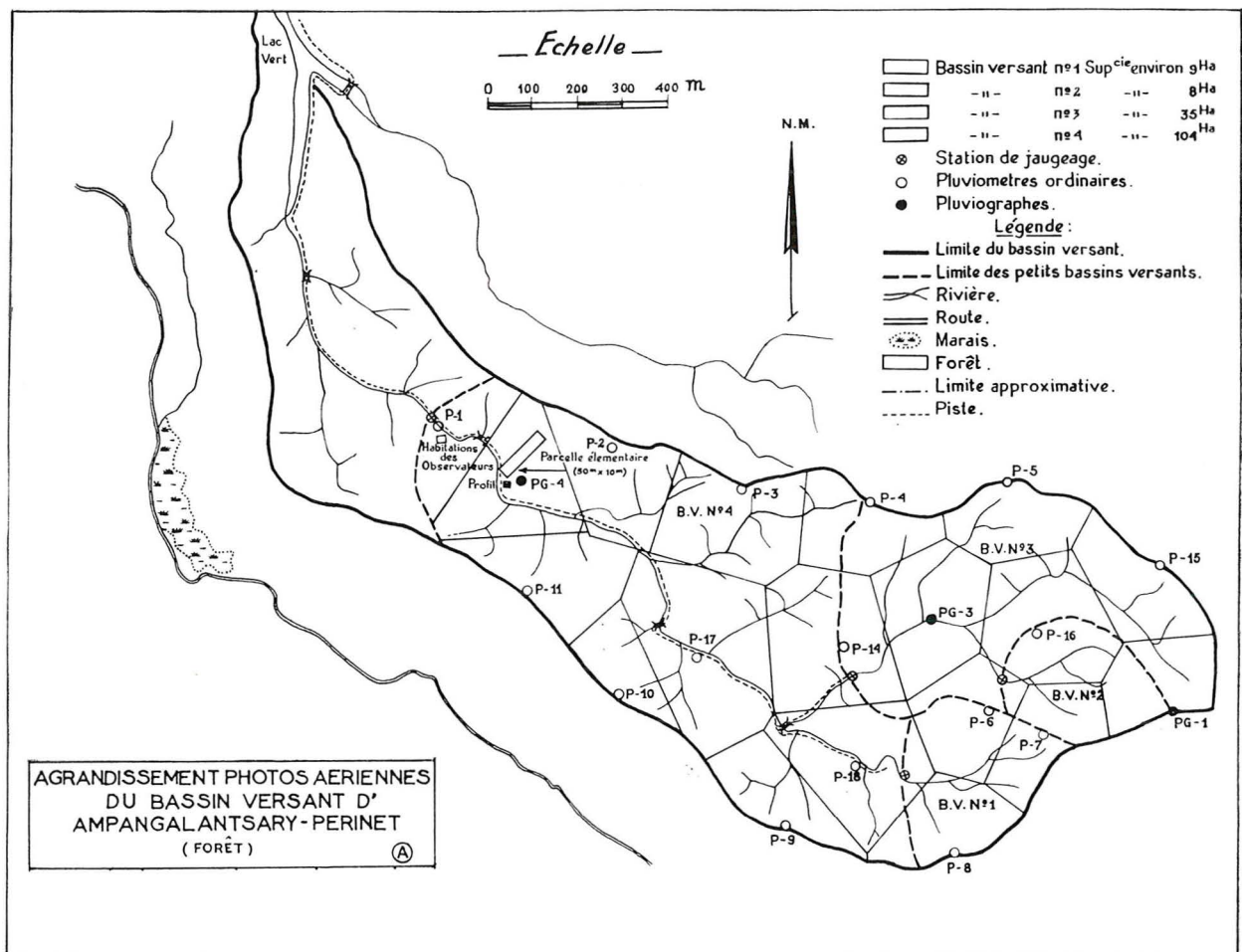


FIG. 8.



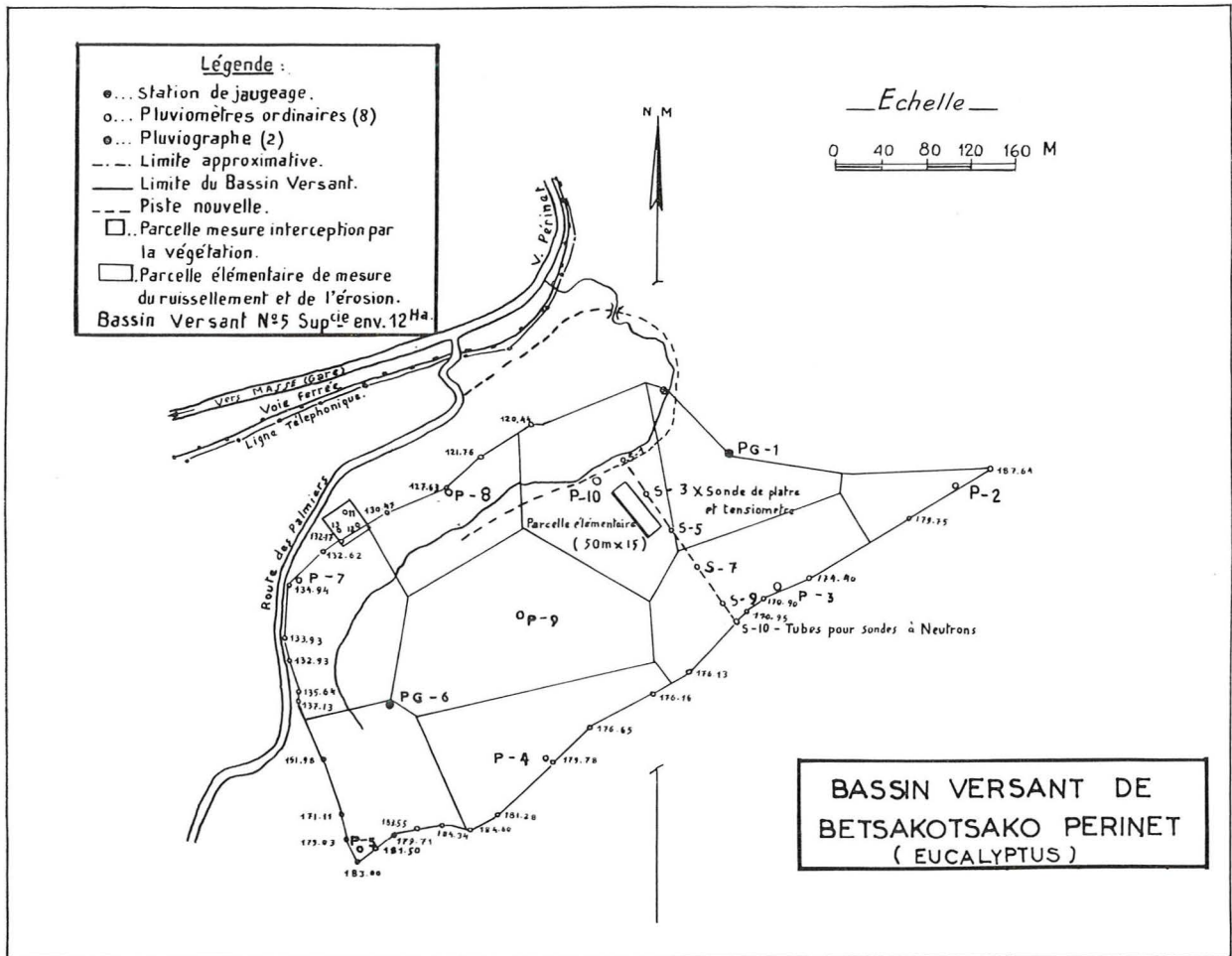


FIG. 9.

Les tableaux ci-dessous donnent les principales caractéristiques physiques et l'équipement des bassins d'Ampangalatsary.

TABLEAU N° 4

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES PRINCIPALES DES BASSINS D'AMPANGALATSARY

Bassin	Superficie (ha)	Longueur max. du Thalweg p/pal (m)	Coefficient de compacité de Gravelius *
D1	9.18	365	1.13
D2	7.14	400	1.04
D3	38.88	1.000	1.09
D4	100.96	2.825	1.84

(\*) Le coefficient de compacité de Gravelius est le rapport entre la surface d'un bassin et la surface du cercle de même périmètre. Il est donné par la formule

$$C = 0,28 \frac{P}{100 \sqrt{A}} \quad (P = \text{périmètre du bassin en m})$$

$$(A = \text{surface du bassin en ha}).$$

Plus C est proche de 1, plus le bassin a une forme ramassée.

(Les surfaces ont été calculées à partir de photographies aériennes, les longueurs mesurées au curvimètre sur des plans tirés de ces photographies.)

TABLEAU N° 5

ÉQUIPEMENT LIMNIGRAPHIQUE DES BASSINS D'AMPANGALATSARY

Bassin	Déversoir			Limnigraphe	
	Type	Pelle	Largeur	Type	Réduction
D1	H 2,5 pieds	—	—	Ott	1/2,5
D2	H 2 pieds	—	—	Richard	1/2
D3	Bazin	0,80 m	1 m	Ott	1/2,5
D4	Bazin	0,80 m	2 m	Ott	1/5

Nota :

1) Les limnigraphes, aussi bien Ott que Richard sont à flotteur et à enregistrement continu.

2) D1 a eu un déversoir Bazin (pelle 0,80 m, largeur 0,40 m) jusqu'au 15 septembre 1964.

Sur ces bassins versants sont répartis 16 pluviomètres et 3 pluviographes. Les pluviomètres sont

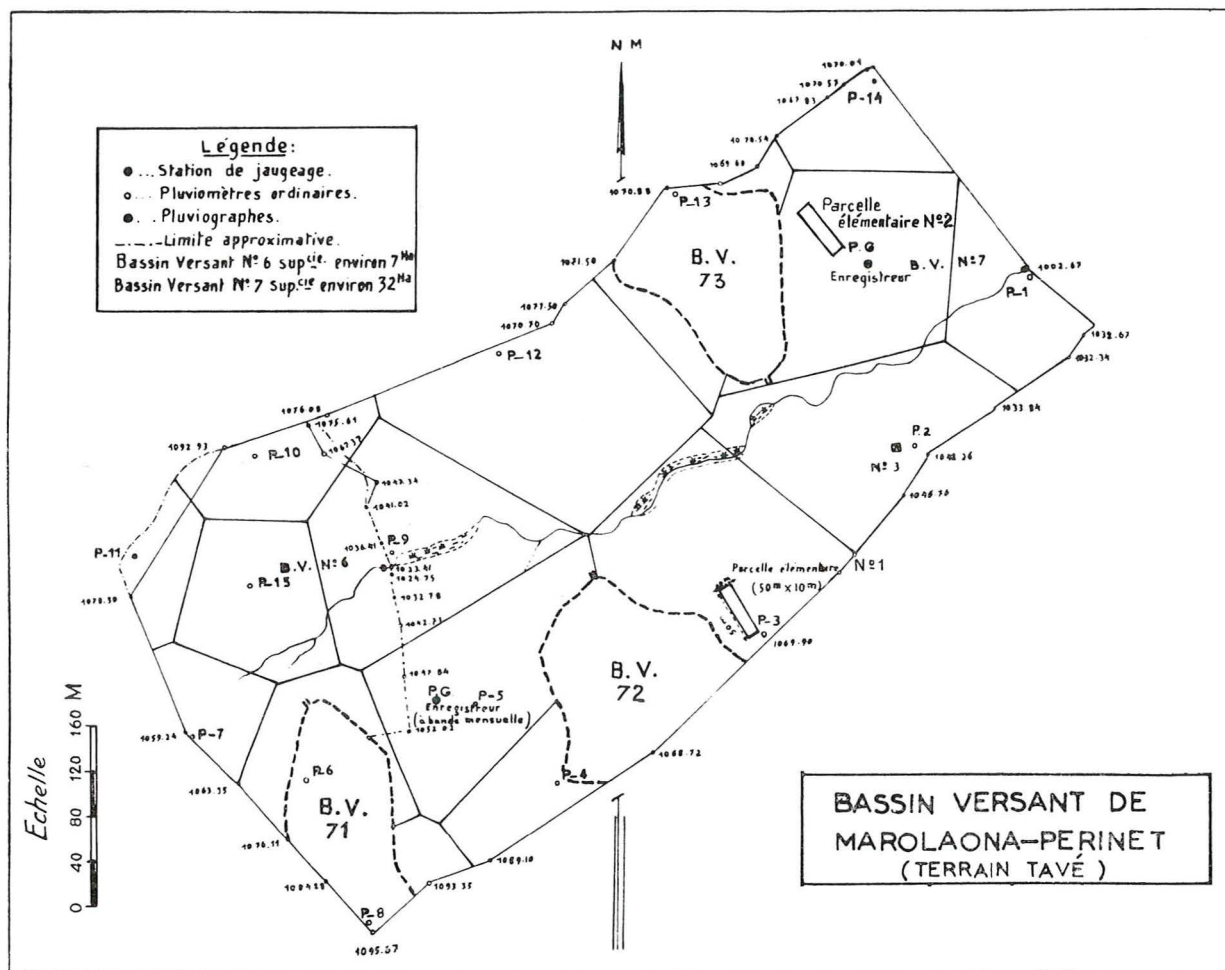


Fig. 10.

disposés, pour la plupart sur la ligne de crête qui limite le grand bassin, les pluviographes plus au centre. Les pluviomètres sont du type « Association », avec une bague de 400 cm<sup>2</sup> ; ils sont presque tous montés sur des plates-formes ou sur des arbres écimés, à des hauteurs variant de 8 à 10,50 m pour ne pas subir l'influence des arbres environnants.

Les pluviographes sont à augets basculeurs avec enregistrement journalier. La bague des pluviographes est aussi de 400 cm<sup>2</sup>. Les pluviographes sont également installés sur des plates-formes, les bassins versants 1 et 2 n'ont qu'un pluviographe à eux deux, situé sur bassin versant 1 et appelé PG1.

— Station de Betsakotsako (B. V. 5 sous *Eucalyptus*).

Ce bassin a une forme grossièrement rectangulaire d'axe longitudinal Sud-Ouest-Nord-Est, mais avec deux pointes rajoutées, une petite au Nord, une grande à l'Est. Le versant droit du bassin est beaucoup plus étendu que le versant gauche et il monte par une pente moyenne (maximum 40-45 %) vers une crête assez marquée qui limite le bassin sur son côté Sud-Est.

Les caractéristiques physiques du bassin versant 5 sont les suivantes :

TABLEAU N° 6

Superficie	Longueur max. du Thalweg (m)	Coefficient de compacité de Gravelius
13,26 ha	580	1,26

Son équipement limnigraphique est le suivant :

Déversoir = type Bazin, pelle 0,60 m, largeur 0,40 m ;

Limnigraphie = Ott à enregistrement continu, réduction 1/5 ;

Pluviographe = un pluviographe installé sur une plate-forme de 6 m de haut ;

Pluviomètres = au nombre de 8 (même type qu'à Ampangalatsary) montés sur des plates-formes de 10 à 27 m de haut.

— Station de Marolaona (brousse secondaire).

La forme de l'ensemble est presque rectangulaire, le cours d'eau étant situé bien dans l'axe longitudinal du bassin et coulant vers l'Est, Nord-Est. Les pentes de part et d'autre sont assez fortes (environ 35-45 % près de la ligne de crête). Le quart supérieur du bassin délimite un bassin plus petit,

étudié séparément (le petit bassin est le B. V. 6, l'ensemble formant le B. V. 7). Les caractéristiques et l'équipement limnigraphique de ces deux bassins sont donnés par les tableaux ci-dessous :

TABLEAU N° 7  
CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES  
DES BASSINS VERSANTS DE MAROLAONA

Bassin	Superficie (ha)	Longueur max. du Thalweg p/pal (m)	Coefficient de compacité
B. V. 6	7,27	250	1,19
B. V. 7	31,50	950	1,25

TABLEAU N° 8  
EQUIPEMENT LIMNIGRAPHIQUE  
DES BASSINS VERSANTS DE MAROLAONA

Bassin	Déversoir			Limnigraphie	
	Type	Pelle	Largeur	Type	Réduction
B. V. 6	Bazin	0,80	0,40	Ott	1/5
B. V. 7	Bazin	0,80	1,00	Ott	1/5

Il y a deux pluviographes correspondant à chaque bassin versant (bien que celui du B. V. 6 soit installé un peu en dehors de ce B. V. sur le B. V. 7) ; ils sont montés à 1,50 m du sol.

A cela s'ajoutent 14 pluviomètres « Association » également à 1,50 du sol.

**Localisation des stations les unes par rapport aux autres.**

Les distances des centres des bassins versants au centre de la Station Forestière d'Analamazaotra sont approximativement :

- Marolaona : 4 km vers le Sud-Sud-Est.
- Ampangalatsary : 2 km vers le Sud-Est.
- Betsakotsako : 1,5 km vers l'Ouest-Nord-Ouest.

La plus grande distance entre ces stations est d'environ 4,5 km à vol d'oiseau entre Marolaona et Betsakotsako.

Dès le mois de novembre 1962 les premières mesures étaient effectuées. Mais d'inévitables aléas, en particulier des débordements aux stations de jaugeage dus aux fortes pluies des premières années, les tâtonnements nécessaires à la mise au point des méthodes, font que le bilan de l'eau ne peut être calculé rigoureusement qu'à partir de la campagne 1964-65. Avec les derniers dépouillements de la campagne 1971-72, ce sont au total huit années d'observations qui sont disponibles (Certains résultats des deux premières campagnes sont cependant utilisables, portant pour certaines mesures cette durée à dix ans.)

**Bassins élémentaires de Marolaona.**

Afin de tester l'influence des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion, en particulier celle de la culture sur brûlis en forte pente, on a installé en 1963, trois bassins versants élémentaires sur le bassin de Marolaona. Ces bassins se rapprochent du point de vue conception de ceux de Manankazo.

— Bassin versant 71 de 1,36 ha laissé comme témoin et couvert de forêt secondaire en voie de reconstitution (vieille savoka) ;

— Bassin versant 72 de 1,77 ha cultivé en courbes de niveau avec andains anti-érosifs et plantation de fruitiers associés (bananes) ;

— Bassin versant 73 de 1,73 ha cultivé en tavy traditionnel (culture de riz pluvial après brûlis) les deux premières années et laissé depuis en jachère.

Tous ces bassins versants sont équipés d'un dispositif de jaugeage (eau et terre) (1) et d'appareils de mesure pluviométrique.

L'expérimentation a été continuée jusqu'à la fin de la campagne 1971-72.

## ZONE SUB-ARIDE DU SUD DE MADAGASCAR (ANTANIMORA)

### DESCRIPTION DU MILIEU.

L'expérimentation a été réalisée dans la sous-préfecture d'Antanimora en plein Androy cristallin.

Les bassins comparés sont situés sur des gneiss peu micacés et schistes cristallins du groupe d'Ampandrandava. Ces gneiss ont une structure isoclinale serrée.

Le relief du bassin de Tsimandaha est celui d'une espèce d'auge perchée par rapport à la plaine alentour. Il est très nettement encadré par deux crêtes Nord-Sud et forme une unité topographique bien définie.

Les pentes des versants, mis à part les abrupts qui dominent les points culminants des crêtes, sont de l'ordre de 6 à 12 %. Le ruisseau Tsimandaha a une pente de 1 % en amont du barrage, pente qui va en augmentant vers l'amont.

Le bassin d'Ianamolora jouxte, sur un côté, le bassin de Tsimandaha. Il a un relief assez comparable avec des abrupts rocheux sur une partie de

(1) Canal calibré de type H (U. S. Soil Conservation Service) d'une hauteur :

- de 2 pieds pour le bassin 71,
- de 2,5 pieds pour les bassins 72 et 73.

ses limites. Sa forme est cependant moins allongée que celle de Tsimandaha et de plus sa dégradation au départ était moins prononcée.

**Le climat** de la région est aride, caractéristique du Haut-Androy, avec une pluviométrie moyenne de 600 mm et une sécheresse de 8 mois très marquée. Les premiers orages peuvent survenir fin novembre, mais la vraie saison des pluies se situe entre décembre et février.

La variabilité est très grande d'une année à l'autre et il en résulte que l'économie agricole est très précaire et marginale.

Les précipitations peuvent être parfois très violentes et sont à caractère orageux (les précipitations sont souvent très différentes à quelques centaines de mètres de distance).

On a pu constater des pluies de plus de 30 mm en un quart d'heure soit des intensités de plus de 2 mm/mn durant 15 mn.

**Les sols** sont des sols ferrugineux tropicaux sur gneiss :

- sols squelettiques sur gneiss sur la pente,
- sols colluvionnés de bas de pente ou de replats,
- sols colluvionnés alluvionnés ;
- sols de bas-fonds souvent enterrés sous la couche de sable apportée par l'oued, sols noirs limoneux compacts.

L'analyse des prélèvements derrière murettes et

sur les alluvions fertiles est donnée dans le tableau n° 9.

Les terres des alluvions sont utilisables pour des cultures vivrières Vohemba (1), Sorgho, Antaka (2), Patates, les alluvions du lit majeur peuvent porter des cultures de Maïs. Ces sols sont, en général bien pourvus en éléments minéraux, mais ils sont pauvres, voire même très pauvres en  $P_2O_5$ .

La perméabilité (méthode HENIN) est donnée par le tableau ci-dessous.

TABLEAU N° 10. — PERMÉABILITÉ

Emplacement du prélèvement	Numéro du prélèvement	K en cm/h
Lit du ruisseau . . . . .	1-1	3,00
	1-2	3,8
	3-1	170
	3-2	10
	3-3	1,26
	6-1	230
Alluvions de bas de pente. . .	8-1	2,2
	8-2	2,5
Alluvions perchées . . . . .	4-1	1 25
	4-2	2 8
Alluvions fertiles au bord du lit majeur . . . . .	5-1	2,6
	5-2	2,8

(1) Vohemba = *Vigna sinensis*.

(2) Antaka = *Dolichos lablab*.

TABLEAU N° 9. — ANALYSE DES PRÉLÈVEMENTS A ANTANIMORA

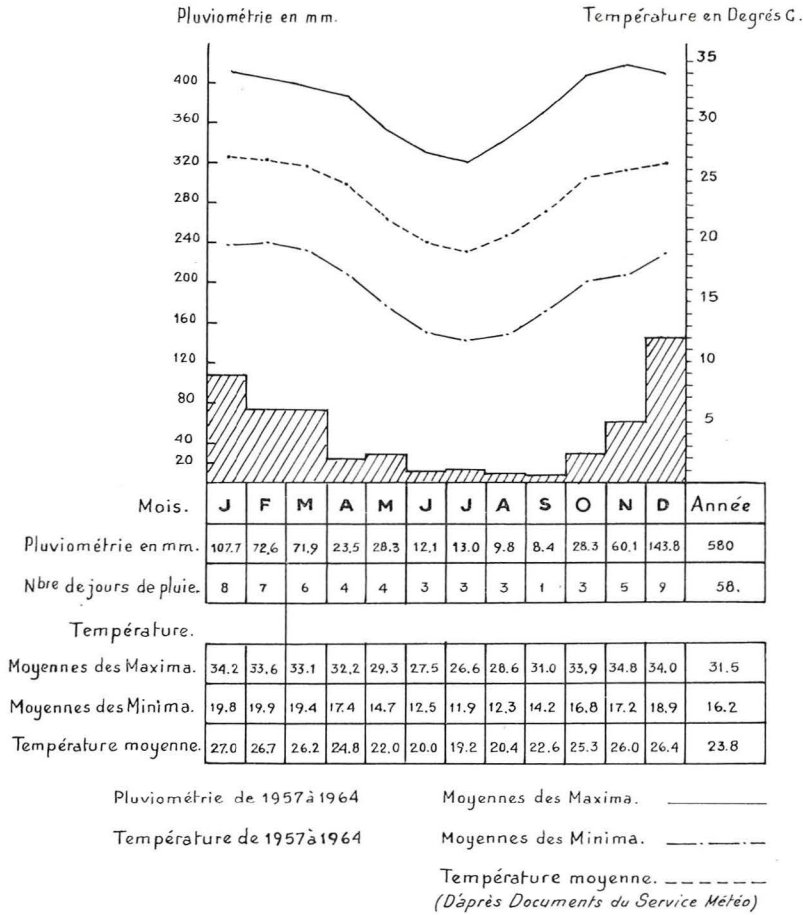
N° échantillons	4-1	4-2	5-1	5-2
Argile % . . . . .	5,5	19,1	2,5	12,1
Limons % . . . . .	4,0	8,2	24	22
Sables très fins % . . . . .	6,2	5,4	8,7	5,6
Sables fins % . . . . .	30,45	21,99	15,24	14,41
Sables grossiers % . . . . .	50,08	38,01	40,95	37,53
Matière organique totale % . . . . .	2,65	3,29	4,99	3,18
Acides humiques ‰ . . . . .	0,47	0,38	1,06	0,63
Carbone organique % . . . . .	1,53	1,90	2,89	1,84
Azote total ‰ . . . . .	pm 1,00	r 2,48	m 1,48	p 0,52
Rapport C/N . . . . .	b 15,3	f 7,6	b 19,5	c 35,5
CaO échangeable ‰ . . . . .	m 0,770	r 1,780	tr 2,770	tr 3,400
MgO échangeable ‰ . . . . .	r 0,343	tr 0,844	tr 1,4	tr 2,264
K <sub>2</sub> O échangeable ‰ . . . . .	m 0,137 5	m 0,150	m 0,106	p 0,088
Na <sub>2</sub> O échangeable ‰ . . . . .	0,052	0,057	0,104	0,310
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assimilable ‰ (Truog) . . . . .	p 0,056	tp 0,019	tp 0,030	p 0,040

tp = très pauvre  
p = pauvre  
m = moyen  
r = riche

tr = très riche  
b = bon  
f = faible  
c = excessif

**STATION D'ANTANIMORA (Forêt)** Alt : 300 m  
 Lat : 24°49' Long: 45°40'  
**Observations Climatologiques.**

FIG. 11.



Les échantillons 3-1 et 6-1, composés presque exclusivement de sables grossiers et de graviers (A + L = 2 %), présentent une très forte perméabilité qui sera utilisée dans la technique du piège à sable.

**La végétation** est constituée :

- d'une steppe dégradée à *Heteropogon contortus* rabougri sur les pentes ;
- d'une prairie à *Heteropogon contortus* sur les zones d'atterrissement et de colluvions ;
- d'une prairie de bas-fond à *Panicum*, *Eragrostis* et *Heteropogon contortus* en bordure du ruisseau ;
- de quelques vestiges de bush, très xérophyte sur les crêtes (*Allaudia procera* et *A. dumosa*, *Commiphora*, *Girocarpus*, *Euphorbes*, *Acacia*, *Albizia*, *Pachypodium*, *Calanchoe* et arbustes divers) ;
- des vestiges d'une formation ripicole arborée dans les bas-fonds.

Les conditions naturelles peuvent donc se résumer ainsi :

- climat aride avec une courte saison des pluies et des précipitations concentrées de type orageux ;
- sols squelettiques sur gneiss ;
- végétation très clairsemée et dégradée par suite de l'exploitation par le feu et le surpâturage.

Ces conditions entraînent des manifestations violentes d'érosion qui se traduisent en général :

- sur les pentes par du ruissellement et une érosion en nappe forte entraînant la formation de ravines individualisées et creusement de collecteurs secondaires,
- par un colluvionnement sur les replats et les bas de pentes provoqué par l'érosion sélective des versants,
- enfin par des transports dans le collecteur principal lors des brusques crues, avec encombrement du lit et souvent attaques des berges.

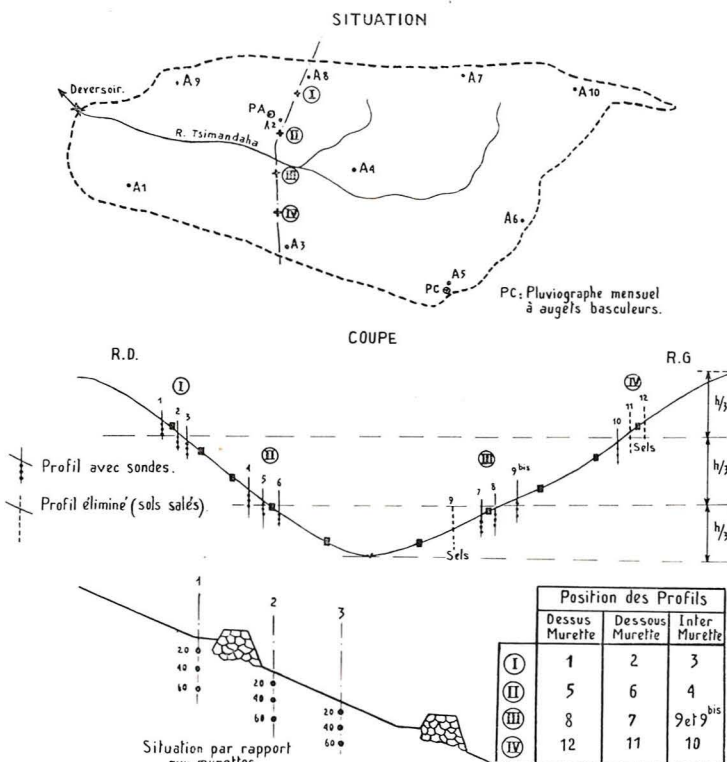


FIG. 12. — Bassin versant de Tsimandaha. Schéma de mise en place des sondes et du pluviographe P.C.

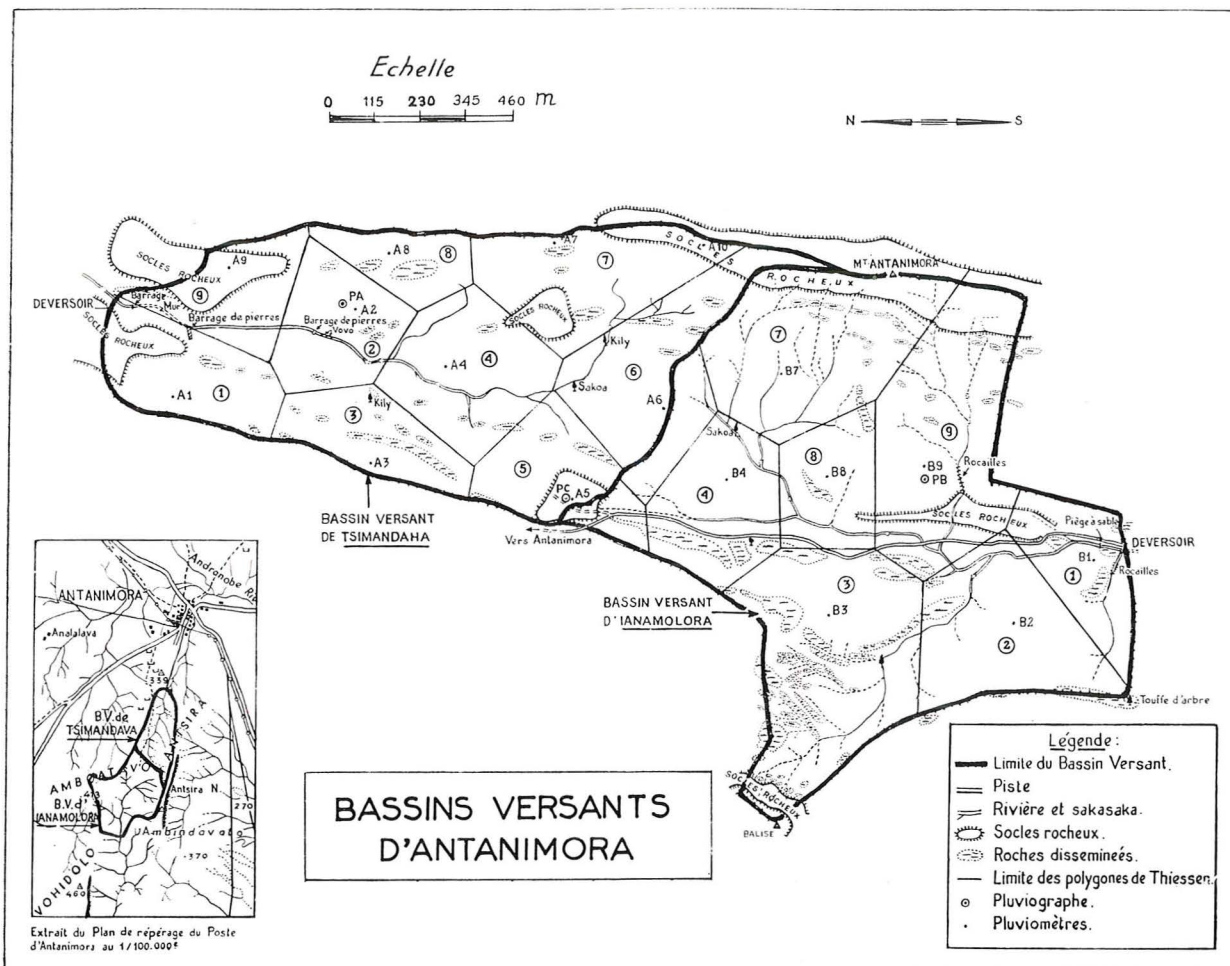


FIG. 13.

## TRAVAUX RÉALISÉS.

### Travaux de protection sur le bassin traité de Tsimandaha.

Dès 1960 un relevé du bassin fut réalisé par le Service des Eaux et Forêts et la mise en défens rigoureuse (pâturage et feu de prairie) a été respectée intégralement depuis cette date. Ceci a été obtenu, grâce à l'accord des populations.

Les cultures sur les colluvions et le lit majeur n'ont pas été interdites et elles se sont étendues dans de notables proportions, le Service des Eaux et Forêts veillant à ce que les cultures demeurent à leur place sans qu'il y ait destruction des ouvrages

### Travaux sur les versants.

Au total 30.000 m de murettes en pierres sèches à profil grossièrement trapézoïdal de 1 m de base inférieure, 0,70 m de base supérieure et environ 0,50 m de hauteur ont été réalisés sur les versants. Ces murettes sont continues, sans pente longitudinale et chacune séparée de la suivante par une dénivellée de 4 m.

Les ravines et collecteurs secondaires ont été traités avec des seuils rustiques en pierres sèches raccordés aux murettes isohypses.

### Ouvrages dans le thalweg principal.

Dans la partie supérieure du thalweg principal, on a réalisé des barrages en pierres sèches séparés par des biefs qui, après atterrissement, ont une pente longitudinale de 2 ‰. Ces barrages ont des parements amont et aval de pente 1/1, la crête une largeur de 0,50 m. Plus de 25 barrages de ce type ont été réalisés, ils se sont rapidement atterrissés et ont très bien fonctionné. Ils nécessitent cependant de l'entretien.

Dans la partie inférieure, on a réalisé tout d'abord des barrages filtrants en grillage Ursus fixés sur pieux et ancrés dans les berges par du câble de 12 mm. Ces ouvrages n'ont pas résisté et ont été très gravement endommagés dès la première saison.

C'est pourquoi, en 1967, ils furent entièrement reconstruits en pierre. Ils ont alors été rapidement atterrissés et ont parfaitement fonctionné par la suite.

Les barrages du cours inférieur du lit sont prolongés par des ailes d'épandage qui ont été réali-

sées en grillage fixé sur cornières métalliques. Ce dispositif a donné assez peu satisfaction, le grillage étant couché à certains endroits et le courant peu freiné, il a été par la suite remplacé par des ailes en murettes de pierre.

#### **Travaux de délimitation du bassin témoin d'Ianamolora.**

Le bassin témoin reconnu en 1962 a été levé par le Service des Eaux et Forêts et un plan a été dressé. Aucun travail de protection n'a été réalisé. Cependant il faut noter qu'un dispositif expérimental de barrage « piège à sable » destiné à retenir l'eau dans le sable a été établi en 1962 à une centaine de mètres en amont du dispositif de mesure.

#### **Dispositifs de mesure mis en place.**

Sur le conseil du Chef de la Section Hydrologique de l'O. R. S. T. O. M., un déversoir en « V » à paroi épaisse a été réalisé sur Tsimandaha en 1961. Ce déversoir est équipé d'un limnigraphe Richard à réduction 1/10. Sur ce bassin, 9 pluviomètres et un pluviographe à augets ont été installés (voir carte des bassins fig. 13).

Sur le bassin d'Ianamolora, un déversoir identique à celui de Tsimandaha et comportant le même équipement, a été construit en 1962. Neuf pluviomètres et un pluviographe à augets basculeurs constituent le réseau pluviométrique.

Enfin, quelques dispositifs et appareillage divers destinés à préciser nos connaissances en ce qui concerne les conditions météorologiques (Thermohygrographe) ainsi que la dynamique de l'eau dans le sol et en nappe libre, ont été installés en 1965.

### **RÉALISATION DES OBSERVATIONS.**

#### **Ruissellement, débits d'étiage, pluviométrie.**

L'appareillage installé sur les deux bassins a permis d'enregistrer toutes les variations de hauteur du plan d'eau aux déversoirs et ainsi, grâce à la courbe de tarage fournie par l'O. R. S. T. O. M., de déterminer, d'une façon sans doute approchée mais

comparable d'un bassin à l'autre, les débits de crue respectifs.

En ce qui concerne les petits débits, la précision de la courbe de tarage étant insuffisante, des jauges ont été réalisés sur les deux bassins à l'aide d'un récipient de 100 l et d'un chronomètre, ces mesures étant effectuées matin et soir.

Sur chacun des deux bassins sont disposés 9 pluviomètres et 1 pluviographe journalier à augets basculeurs. Les pluviomètres sont relevés deux fois par jour lorsqu'il a plu. Le calcul de la lame d'eau tombée lors de chaque pluie est pondéré par la méthode des polygones de THIESSEN (1).

L'intensité des précipitations et leur répartition dans le temps sont déduites des enregistrements pluviographiques.

Tous ces appareils ont fonctionné correctement depuis leur mise en place. L'ensemble des observations a été effectué par deux observateurs et deux aides sous la surveillance de l'Agent Technique de la Station Forestière d'Antanimora et du Chef d'Inspection de Fort-Dauphin.

#### **Evaporation de l'eau.**

Le dispositif installé en janvier 1965 a fonctionné correctement.

En ce qui concerne les cuves d'eau libre, le niveau de l'eau est ramené à zéro par apport d'eau tous les 15 jours. De plus, afin d'éviter les corrections dues aux précipitations naturelles, les cuves de sable sont fermées à l'aide d'un couvercle dès la première goutte de pluie et ce couvercle est retiré dès la fin de la pluie.

#### **Profils hydriques.**

Les mesures de conductivité sur les dix profils de sondes de plâtre mis en place ont été effectuées régulièrement trois fois par semaine à l'aide d'un conductivimètre à piles. Cet appareil est malheureusement tombé en panne, par deux fois, en janvier 1966 et de juillet à septembre 1966. Il nous a cependant permis de faire un certain nombre d'observations intéressantes dont les résultats sont donnés plus loin.

## **ZONE COTIÈRE NORD-OUEST (BEFANDRIANA-NORD)**

### **DESCRIPTION DU MILIEU.**

Cette étude a été réalisée sur le barrage d'Andranomaninty situé à 300 m environ de la route Befandriana-Antsohihy à 6 km de Befandriana-Nord. Ce barrage avait été construit en 1964 par le Service des Eaux et Forêts (D. R. S.) en vue du stockage de l'eau et de l'alimentation de 6 ha de rizières situées en aval.

Le bassin versant qui ne fait que 25 ha est allongé d'Est en Ouest. Le thalweg présente trois parties :

- à l'Est une zone très pentue et dégradée,
- au centre et au Sud une zone au relief moins

accusé mais très érodée au niveau d'anciens terrains de culture,

— enfin une zone de colluvions assez large qui se termine dans la retenue collinaire déjà très envasée.

(1) Cette méthode consiste à découper les bassins en autant de polygones qu'il y a de pluviomètres et à faire la moyenne des résultats obtenus pour chacun d'eux (voir fig. n° 13).

La densité des pluviomètres étant importante (supérieure à 1 par 20 ha) et les différences observées durant les premières campagnes, faibles, on a utilisé simplement la moyenne arithmétique au cours des 2 dernières campagnes.

FIG. 14. — Station d'Andranomanintsy. Befandriana-Nord. Moyenne de la climatologie des 5 campagnes : 1968-69 à 1972-73.

Le climat est de type tropical sec à régime de « mousson » accusé avec une pluviométrie de 1.500 à 2.000 mm irrégulièrement répartie sur 6 à 7 mois et une température moyenne de l'ordre de 26 °C. Les précipitations ont souvent un caractère orageux et les intensités peuvent atteindre des valeurs extrêmes (75 mm/30 mn) (fig. n° 14).

Les sols sont de type ferrugineux tropical sur roche acide, assez semblables à ceux rencontrés à Antanimora, mais de texture beaucoup moins sableuse. Une analyse en vase de végétation (V. V. 151) réalisée par l'I. R. A. M. sur un échantillon de sol de tanety a donné les résultats ci-après :

— Dès la première coupe on relève une très grande carence en phosphore, ainsi que des carences beaucoup moins graves en calcium et potassium.

— A la deuxième coupe, la carence en phosphore se stabilise tandis que celle en Ca<sup>++</sup> et K<sup>+</sup> s'aggrave sensiblement. La légère déficience en magnésium constatée lors de la première coupe s'accroît nettement.

— A la troisième coupe, apparition d'une grave carence en magnésium, la carence en phosphore s'accroît ainsi que celle en Ca<sup>++</sup> et K<sup>+</sup>.

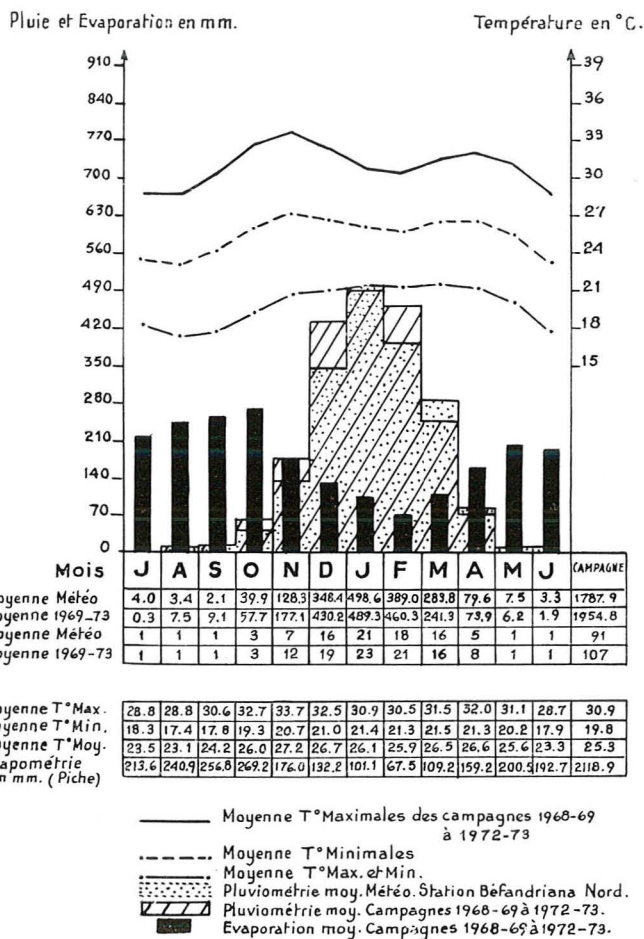
#### En résumé :

- très grave carence en phosphore,
- carences secondaires assez importantes en Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup> et Mg<sup>++</sup>,
- bonne alimentation en soufre et oligo-éléments.

#### DISPOSITIF MIS EN PLACE.

Après une étude des diverses retenues existant dans la région et de leur bassin versant, le barrage d'Andranomanintsy a été choisi pour faire cette étude. Ce barrage fut surélevé de près de 1,5 m et son évacuateur de crue latéral porté à 5 m de large et muni d'un déversoir calibré (1) de type Bazin (pelle de 60 cm) pouvant évacuer jusqu'à 7 m<sup>3</sup>/s et muni d'un petit déversoir central en V pour les petits débits. Un limnigraphe Ott à retournement

(1) Mis au point et taré en collaboration avec la Division d'Hydrologie de l'O. R. S. T. O. M.



fut installé sur la retenue elle-même afin d'enregistrer à la fois les variations du débit du déversoir et les variations de niveau de la retenue. Enfin, 8 pluviomètres et 2 pluviographes ont été répartis sur l'ensemble du bassin.

#### RÉALISATION DES MESURES.

Durant les 4 campagnes, l'appareillage a permis l'enregistrement continu de la hauteur d'eau dans la retenue ainsi que l'intensité des pluies tombées sur le bassin. Ces diagrammes furent contrôlés par des mesures faites à l'échelle limnimétrique au cours de chaque crue et par le relevé des pluviomètres de l'ensemble du bassin.

En ce qui concerne les petits débits, un jaugeage a été réalisé à 7 h et 17 h, chaque jour au déversoir et sur les deux vannes d'irrigation à l'aide d'un récipient de 75 l et d'un chronomètre.

Notons qu'en plus de ces dispositifs, une batterie de 7 parcelles élémentaires de mesure du ruissellement et de l'érosion sous différents couverts a permis de déterminer les caractéristiques de cette zone en matière de conservation des sols et des eaux.





## RÉSUMÉ DES PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS

### INFLUENCE DES COUVERTS NATURELS EN ZONE FORESTIÈRE

(Périnet : expérimentation sur les bassins-versants de Betsakotsako Ampangalatsary, Marolaona)

COMPARAISON DES BILANS ANNUELS SOUS TROIS COUVERTS DIFFÉRENTS (Tableaux en Annexe 2).

Rappelons tout d'abord la numérotation des bassins et des déversoirs. C'est une numérotation que nous reprendrons tout au long du développement sans rappeler la couverture naturelle.

Bassins sous forêt naturelle

- D1 : 9,18 ha
- D2 : 7,14 —
- D3 : 38,88 —
- D4 : 100,96 —

Bassin sous *Eucalyptus robusta*

- D5 : 13,26 ha.

Bassins sous brousse secondaire

- D6 : 7,27 ha
- D7 : 31,50 —

**Pluviométrie annuelle** (fig. 15).

La pluviométrie peut varier de façon très importante entre deux endroits peu éloignés.

Cette variabilité s'observe d'une année sur l'autre, elle est répartie entre tous les mois de l'année et joue sur la hauteur de chaque pluie.

Pour une même station la pluviométrie observée sur les bassins versants se tient cependant assez bien.

**Débit (1) permanent total (DPT)** (fig. 16).

Il s'agit du « débit de base » du bassin versant qui représente non seulement le volume

(1) D'ordinaire on appelle débit un écoulement par unité de temps. Ici on a utilisé ce terme dans le sens plus général de « Volume écoulé ». Ce volume est exprimé en mm (lame d'eau équivalente) ce qui présente l'avantage d'être comparable à la hauteur précipitée.

total écoulé hors crue, mais aussi, pendant les crues, le volume qui se serait écoulé de toute façon (calculé par la moyenne entre les débits permanents de jours avant et après la crue).

Le DPT de D5 (*Eucalyptus*) est plus faible que les autres, il varie moins en valeur absolue, mais plus en valeur relative. Le DPT des quatre bassins d'Ampangalatsary (Forêt naturelle) sont super-

FIG. 15.

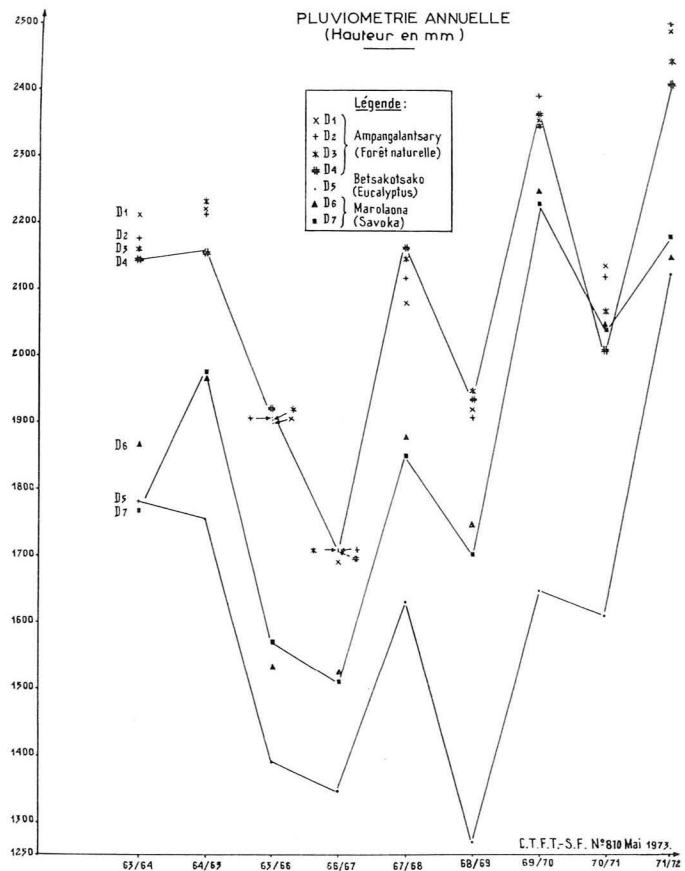


FIG. 16.

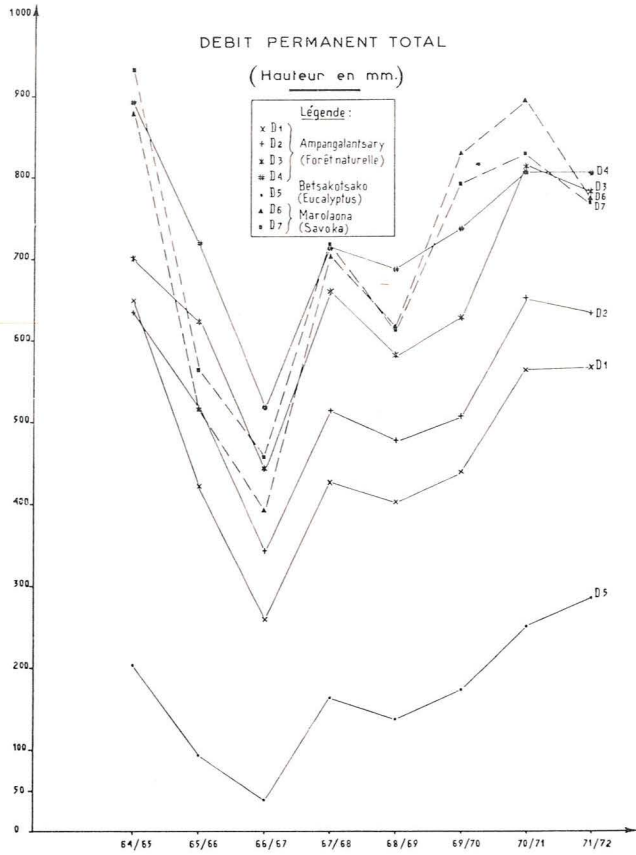
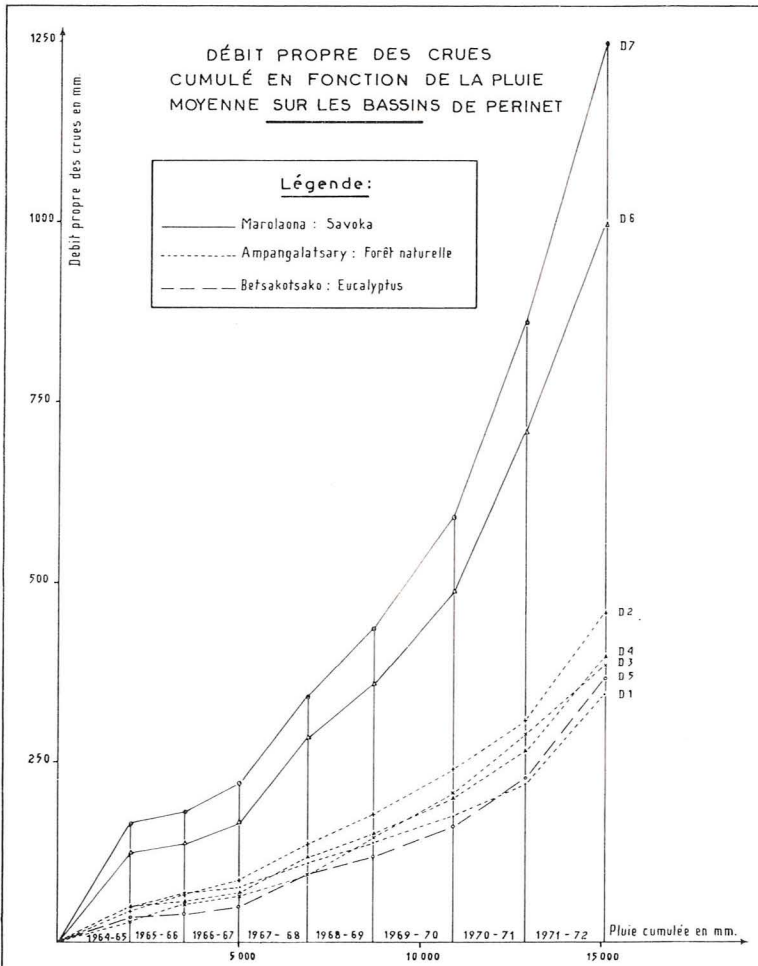
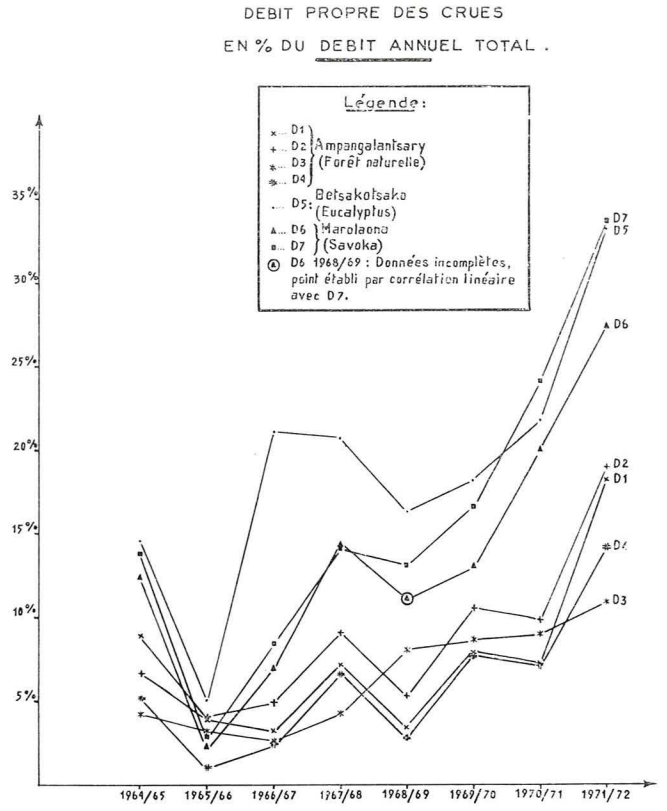


FIG. 19.



posés dans un ordre qui est à peu près celui de leurs superficies (exception faite de D1 et D2 de superficies voisines). Les DPT de Marolaona (savoka) D6 et D7 évoluent comme ceux d'Ampangalatsary mais sont un peu supérieurs.

**Débit propre des crues** (lame d'eau équivalente en mm) (fig. nos 17 et 18).

C'est la lame d'eau écoulée lors d'une crue diminuée du débit de base pendant cette crue. Il représente la somme de la lame ruisselée et de l'écoulement hypodermique.

Les courbes d'Ampangalatsary et Betsakotsako sont très proches les unes des autres. Par contre le débit des crues des bassins couverts de savoka est très supérieur aux autres, et varie apparemment plus considérablement d'une année à une autre. Ceci prouve dès l'abord que la couverture forestière diminue l'importance des crues.

**Débit propre des crues en pourcentage du débit total** (fig. 19).

Les courbes d'Ampangalatsary gardent un peu la même allure.

Le changement notable est pour D5 dont les fluctuations deviennent supérieures à celles des débits de crue de D6 et D7, ceci prouve que pour D5 le débit passant sous forme de crue représente un assez fort pourcentage du débit total (21,5 % en moyenne) et s'explique par le fait qu'à l'étiage le débit à l'exutoire de D5 est généralement très faible, et souvent nul.

#### Débit annuel total (fig. 20).

Les courbes sont très semblables à celles du débit permanent total, surtout grâce au changement d'échelle des ordonnées (le débit des crues représentant un pourcentage assez constant du débit total, les deux courbes se déduisent presque l'une de l'autre par une affinité). Les courbes sont plus relevées pour la dernière campagne, ceci justement parce que cette année les crues ont été abondantes (années très pluvieuses) et ont représenté une part plus importante que d'habitude du débit total.

#### Coefficient d'écoulement global (annuel) (fig. 21 et 22).

Ce coefficient est le rapport du débit annuel total à la pluviométrie annuelle totale. On retrouve donc, mais amorties, les variations du débit annuel total. On note, comme toujours, l'étagement des courbes qui résulte sans doute, quand il s'agit des bassins versants d'un même ensemble, de l'effet d'échelle et, entre bassins différents, de l'influence du couvert.

#### Effet d'Echelle.

Cet effet ne peut être étudié que sur la station d'Ampangalatsary où l'on dispose de quatre bassins dont les superficies s'échelonnent de 7,14 à 100,96 ha et, dans une moindre mesure, sur les deux bassins de Marolaona.

On observe une augmentation marquée de la quantité d'eau ruisselée par hectare sous forme de débit permanent, quand on passe d'un bassin versant donné à un bassin versant de superficie supérieure (1) le coefficient d'écoulement augmente dans le même sens.

Les variations observées sont-elles significatives ? Pour le savoir on a effectué des comparaisons entre moyennes au moyen du test de Student-Fischer.

(1) Exception faite de D1 plus grand que D2 mais donnant des débits plus faibles, ceci étant dû à la nature du sous-sol de D1 (gros blocs rocheux sous le lit du cours d'eau laissant s'échapper une partie de l'eau).

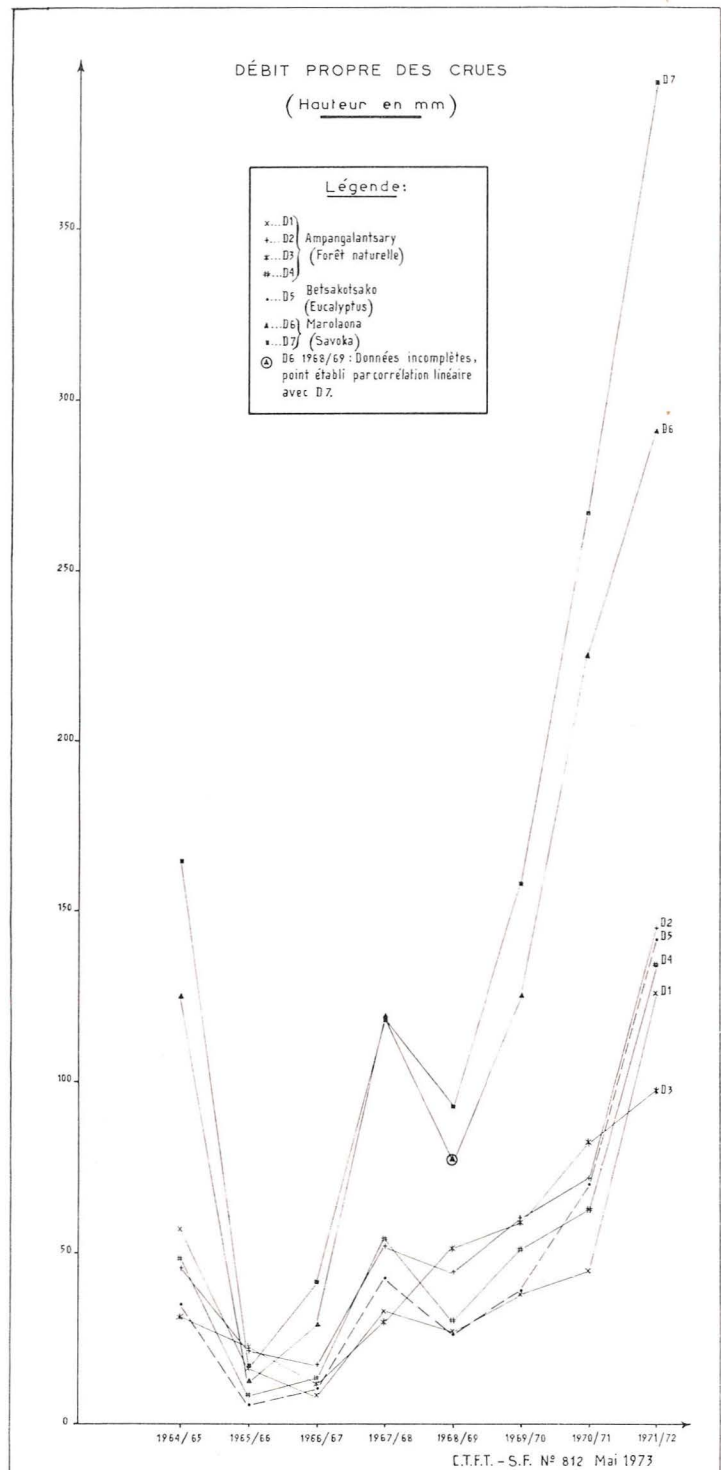


Fig. 17.

#### DÉBIT PERMANENT TOTAL.

Entre D1 et D2 pas de différence significative, ni entre D3 et D4 bien que leurs superficies soient dans le rapport 2,6. On peut expliquer ceci en supposant que le phénomène qui est cause des comportements différents des bassins versants cesse d'in-

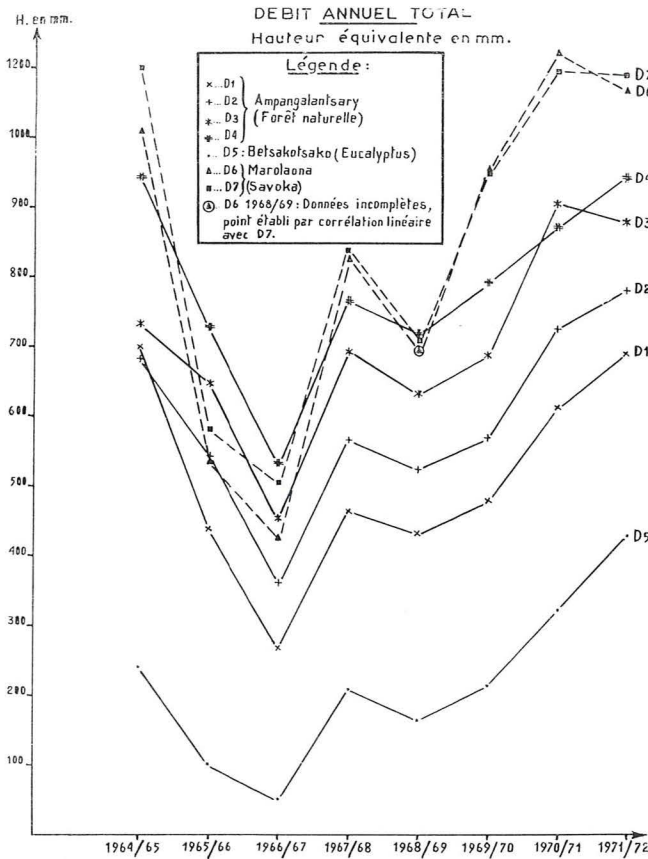


FIG. 20.

tervenir, ou au moins que son action diminue, à partir d'une certaine surface.

Entre D4 et D2 la différence est très significative : l'effet d'échelle joue pleinement entre ces deux bassins. Entre D4 et D1 aussi : le sous-sol de D1 ajoute son effet à l'effet d'échelle. Ceci explique le fait que les différences entre D1 et D3 sont très significatives alors que celles entre D2 et D3 sont juste significatives.

#### DÉBIT PROPRE DES CRUES.

Les différences observées ne sont pas significatives. L'eau qui s'écoule sous forme de crues n'est donc pas soumise à l'influence de la superficie du bassin.

#### DÉBIT TOTAL.

Ce débit est la somme des deux précédents les différences présentent un aspect intermédiaire entre les deux.

D4 et D1 : différences très significatives

D3 et D1 : — —

D4 et D2 : — —

Toutes les autres différences ne sont pas significatives au seuil de 5 %.

#### CONCLUSION SUR L'EFFET D'ÉCHELLE.

Si on suppose, ce qui nous semble licite, que la nature du sol, donc sa perméabilité, est globalement la même sur tous les bassins versants d'Ampangalatsary (D1 excepté) il ne reste que trois facteurs principaux pour expliquer les différences de débit observées.

##### ● Influence de la forme du bassin.

Outre que ce facteur joue ici assez peu (coefficients de GRAVELIUS assez comparables) son action est sûrement de toute façon très faible ; en outre elle jouerait plutôt en sens inverse, un bassin allongé (cas de D4) ayant un rapport surface de l'eau libre (cours d'eau) sur surface du bassin versant plus élevé, donc une évaporation proportionnellement plus grande, donc un débit un peu diminué par rapport à un bassin compact (cas de D2 et D3).

##### ● Influence de la pente moyenne du bassin.

En l'absence de levé précis des bassins versants, il est difficile d'apprécier quantitativement ce facteur. Cependant, il est certain

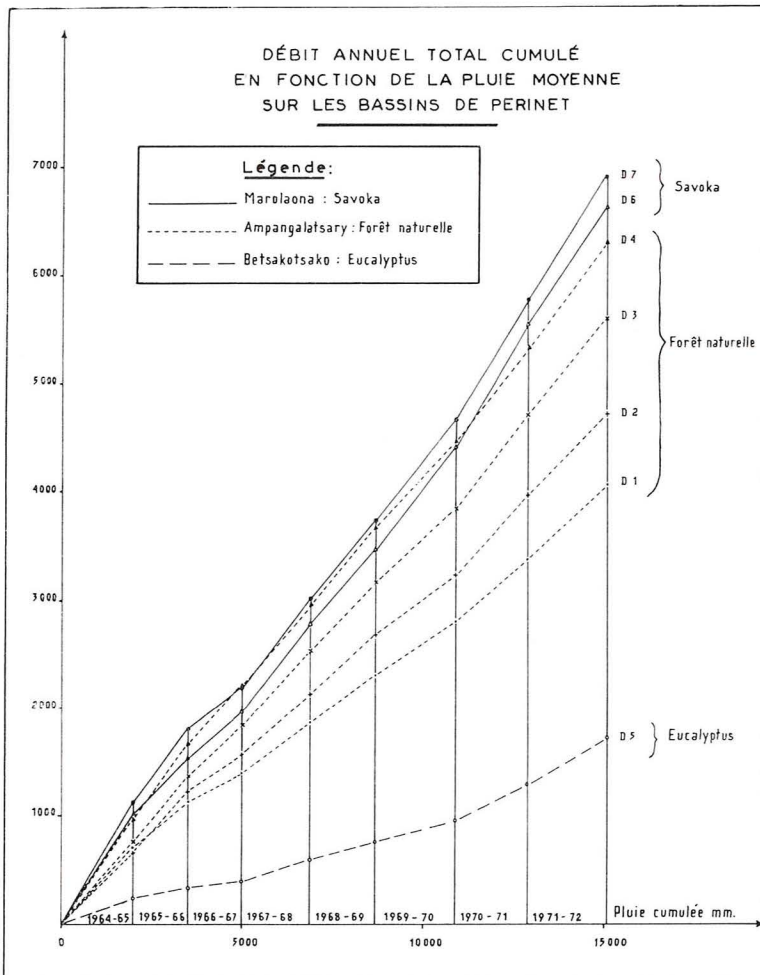


FIG. 21.

FIG. 22.

que la pente des bassins D1 et D2, situés les plus en amont, est supérieure à celle de D3 et *a fortiori* de D4. Or, la plupart des auteurs s'accordent pour reconnaître que le coefficient de ruissellement augmente avec la pente, ce qui se conçoit d'ailleurs aisément.

C'est là qu'il faut se souvenir que le débit propre des crues ne varie pas significativement entre les quatre bassins versants d'Ampangalatsary. Or, si le facteur envisagé (pente plus forte donc coefficient de ruissellement plus fort) devait jouer, il jouerait surtout sur le débit des crues. Le fait que ce ne soit pas le cas semble prouver qu'ici cette explication n'est pas à prendre en compte.

● *Pertes par infiltration et effet d'échelle.*

On est donc amené à penser que si les petits bassins versants ne restituent pas autant d'eau que les grands, c'est surtout parce qu'il y a sur ces bassins une quantité proportionnellement plus importante d'eau qui s'infiltré, s'écoule souterrainement et sort du bassin sans passer par l'exutoire, donc par la station de jaugeage (ceci est notamment le cas de D1, mais pour la raison déjà dite).

On démontre que le rapport des quantités mesurées sur la quantité totale augmente et tend vers 1 quand le périmètre du bassin augmente, ce qui revient à dire que les pertes diminuent quand la taille du bassin s'accroît.

On a une bonne illustration de ceci si l'on porte sur un graphique les coefficients d'écoulement globaux observés à chaque campagne en fonction de la surface des trois bassins retenus (D2, D3 et D4). On obtient un faisceau de courbes d'allure satisfaisante (1) (voir fig. 23).

Pour des surfaces inférieures à 7 ha (bassins élémentaires de Marolaona et parcelles élémentaires) les courbes décroissent très rapidement. En effet, en deçà d'une certaine surface, il ne peut plus y avoir d'écoulement permanent et l'eau ne coule que lors des crues. La parcelle élémentaire d'Ampangalatsary (500 m<sup>2</sup>) ruisselle en moyenne 0,6 % des pluies.

Le bassin 71 de Marolaona de 1,36 ha ruisselle 1,73 % des pluies en 1964-65.

(1) Seule la courbe de la campagne 3 ne peut être représentée, les points par lesquels elle doit passer étant mal disposés entre eux.

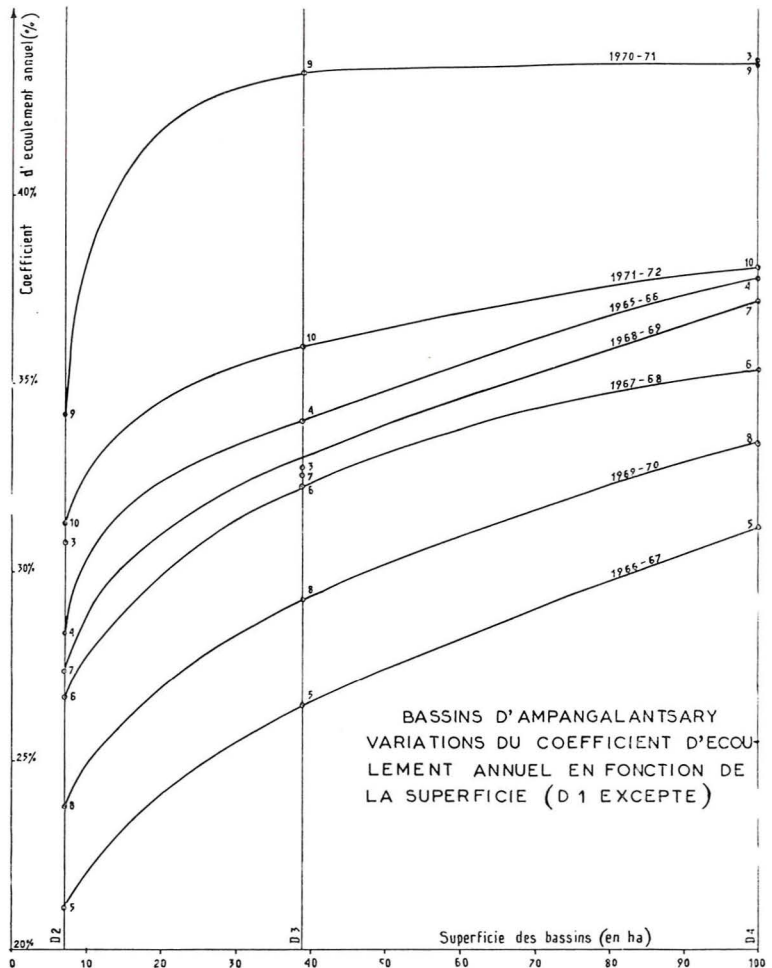
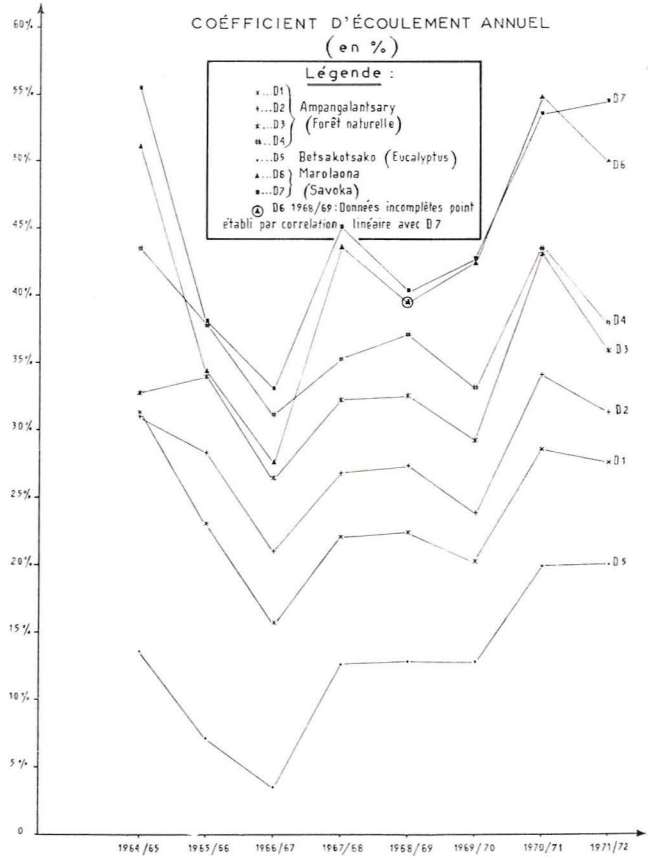


FIG. 23.

La même année, sur Marolaona D6 l'écoulement représente 51,2 % (7,27 ha) et sur D7, 55,5 % (31,5 ha).

**Variation du coefficient d'écoulement global en fonction de la pluviométrie annuelle.**

L'allure étagée des courbes vues précédemment montre que d'une année à l'autre, le coefficient d'écoulement global (ou le rapport : débit permanent total/pluviométrie annuelle) varie. Il semble logique de penser que ce coefficient, qui intègre pourtant déjà la pluviométrie annuelle au dénominateur, dépend de la quantité de pluie tombée. Pour vérifier cette hypothèse on a représenté sur la figure 24 le coefficient d'écoulement annuel, en fonction de la pluviométrie annuelle. Pour ne pas surcharger le graphique on n'a représenté que les bassins D1 et D4 d'Ampangalatsary, le bassin D7 de Marolaona ainsi que D5 de Betsakotsako.

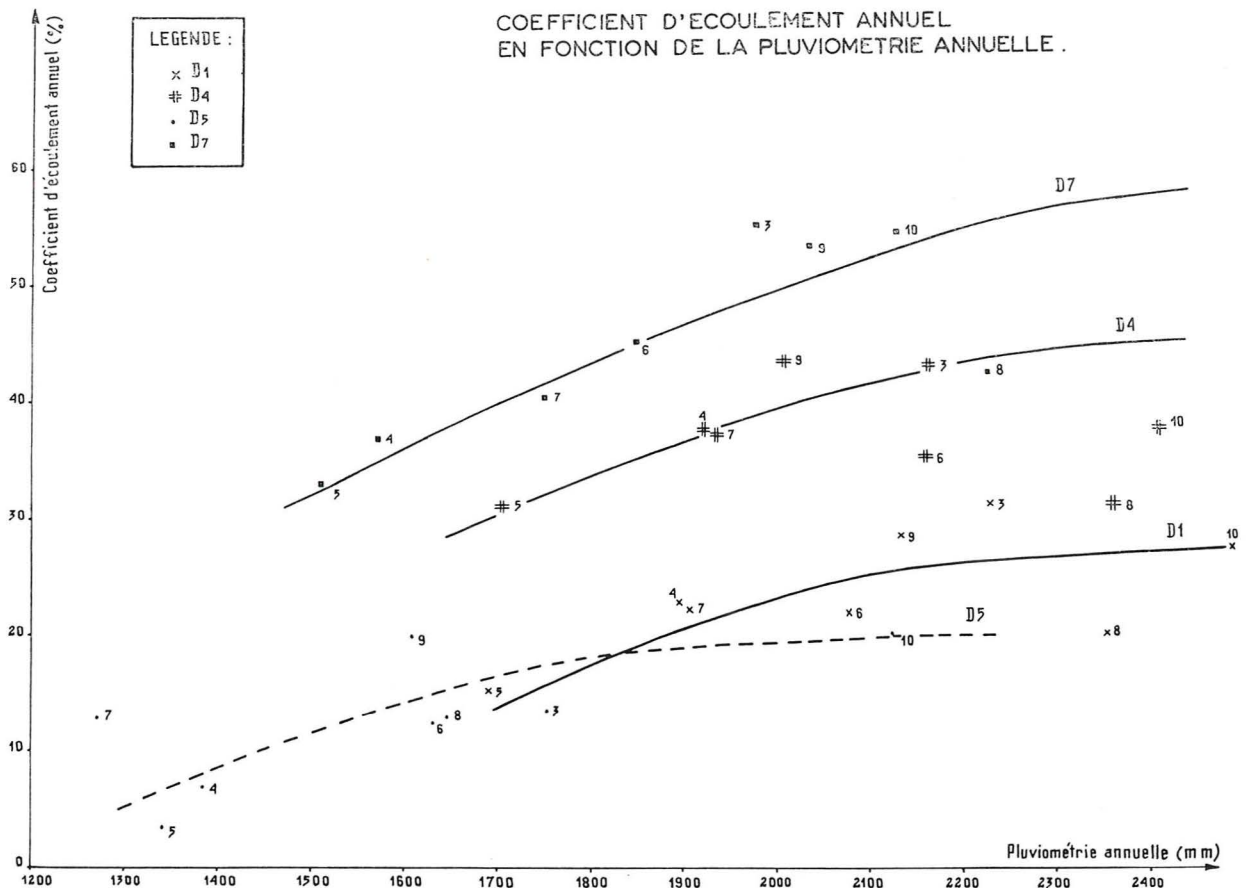
Malgré le faible nombre de points dont on dispose, on observe nettement une augmentation du coefficient d'écoulement annuel avec la pluviométrie. Mais il y a incertitude sur l'évolution de la courbe pour les fortes pluviométries ; on serait

tenté, au vu des points des campagnes 8 et 10, de penser que les courbes redescendent, ceci signifierait que, passé un certain niveau, l'augmentation de débit ne suit plus l'augmentation de pluviométrie et que le coefficient d'écoulement diminue.

En fait, un raisonnement théorique simple tendrait plutôt à prouver que le coefficient d'écoulement annuel doit atteindre une valeur limite mais ne doit pas diminuer. Passé le stade où le sol est entièrement gorgé d'eau et où le drainage souterrain est maximum, toute eau de pluie tombant en supplément doit ruisseler en surface en provoquant une crue et se retrouver finalement à l'exutoire. Si on admet ce raisonnement, le coefficient d'écoulement annuel tendrait asymptotiquement (pour des valeurs très grandes et jamais atteintes de la pluviométrie annuelle) vers 1, mais ne pourrait décroître.

Nous avons admis cette hypothèse et tenu compte du fait que la campagne 8, pluvieuse, a été précédée d'une campagne plus sèche (ce qui explique que le coefficient d'écoulement global de 8 ait été relativement faible, à cause de la reconstitution des réserves du sol) pour tracer les courbes de la figure 24.

FIG. 24.



Les courbes de D1 et D4 sont à peu près semblables, mais décalées d'environ 16 % pour les raisons que nous avons vues au chapitre précédent. La courbe de D7 est au-dessus mais suit, tout à fait celle de D4. Seule la courbe de D5 semble un peu différente, mais la comparaison est difficile à cause de la pluviométrie inférieure de Betsakotsako.

Ceci montre en tout cas qu'il faut tenir compte de la pluviométrie pour faire des comparaisons d'écoulement.

### Conclusions.

#### INFLUENCE DU COUVERT SUR LE BILAN DE L'EAU.

Pour faire une comparaison rigoureuse des ruissellements sous les différents couverts, il faut se reporter dans les cas d'Ampangalatsary et Marolaona à des bassins versants de surface égale à celle du bassin Betsakotsako en pratiquant une interpolation.

On obtient les tableaux suivants : en mm.

TABLEAU N° 11  
D2-3 (Forêt naturelle)

Campagne	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Pluie .....	2.219	1.905	1.707	2.127	1.920	2.374	2.098	2.477	2.103
Débit total .....	700	579	395	612	563	613	791	817	634
Déficit .....	1.519	1.326	1.312	1.515	1.357	1.761	1.307	1.660	1.469

FIG. 25.

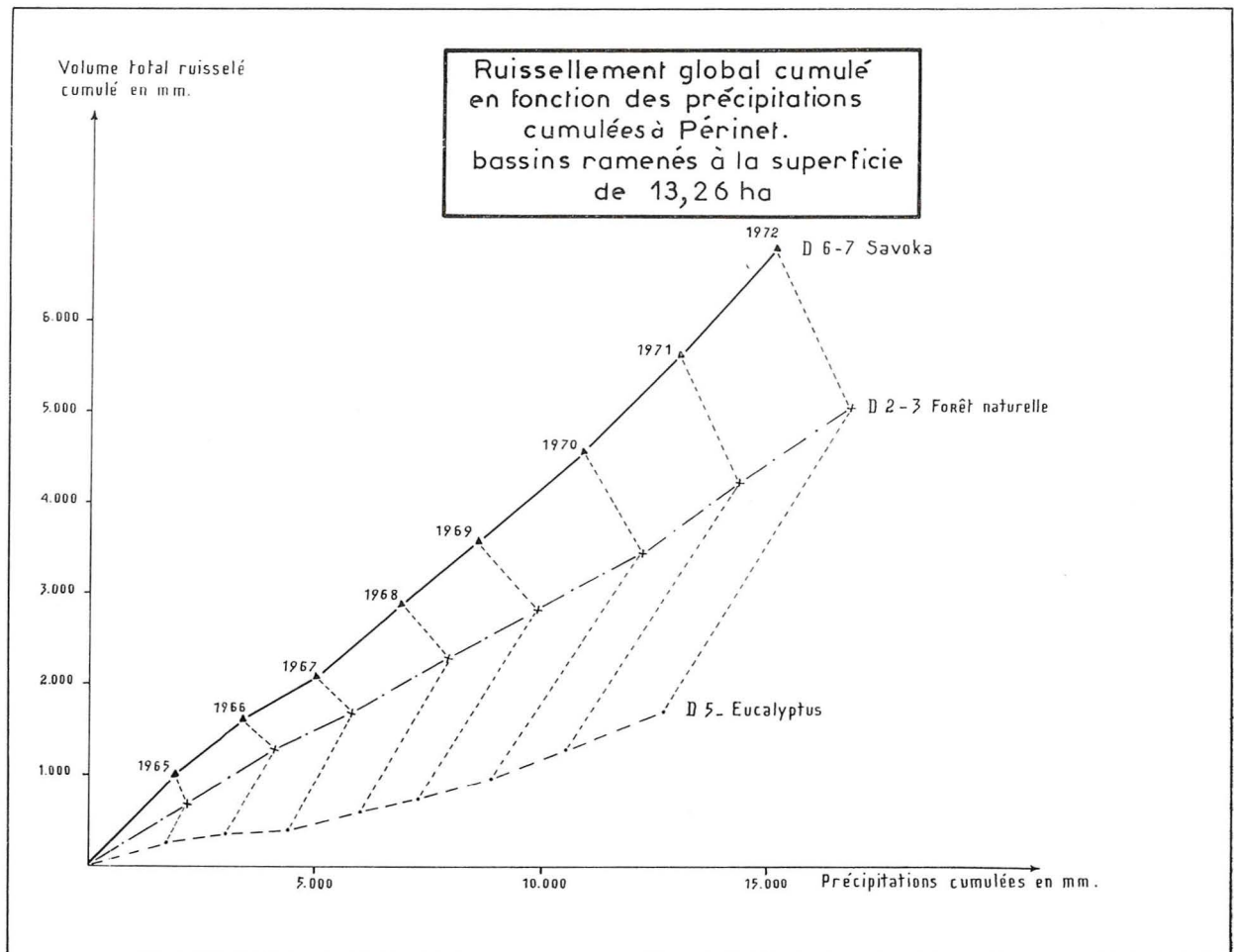




TABLEAU N° 12

*D5 (Eucalyptus)*

Campagne	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Pluie .....	1.753	1.388	1.343	1.629	1.270	1.645	1.608	2.121	1.595
Débit total .....	239	100	50	207	165	213	322	429	216
Déficit .....	1.514	1.288	1.293	1.422	1.105	1.432	1.286	1.692	1.379

TABLEAU N° 13

*D6-7 Savoka ou brousse*

Campagne	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Pluie .....	1.970	1.551	1.517	1.861	1.748	2.235	2.040	2.137	1.882
Débit total .....	1.055	557	463	829	701	953	1.109	1.119	844
Déficit .....	915	994	1.054	1.032	1.047	1.282	931	1.018	1.038

Sur la figure 25 nous avons porté les valeurs du débit total cumulé pour des bassins ramenés à la même superficie en fonction des précipitations reçues sur chaque bassin. Seul l'effet de la couverture végétale apparaît ainsi sur l'écoulement des bassins.

Les valeurs du coefficient d'écoulement sont indiquées dans le tableau n° 14 (rapport débit permanent total/pluviométrie annuelle).

D'après les courbes que l'on a tracées, les coefficients d'écoulement limites (pour une année très

FIG. 26.

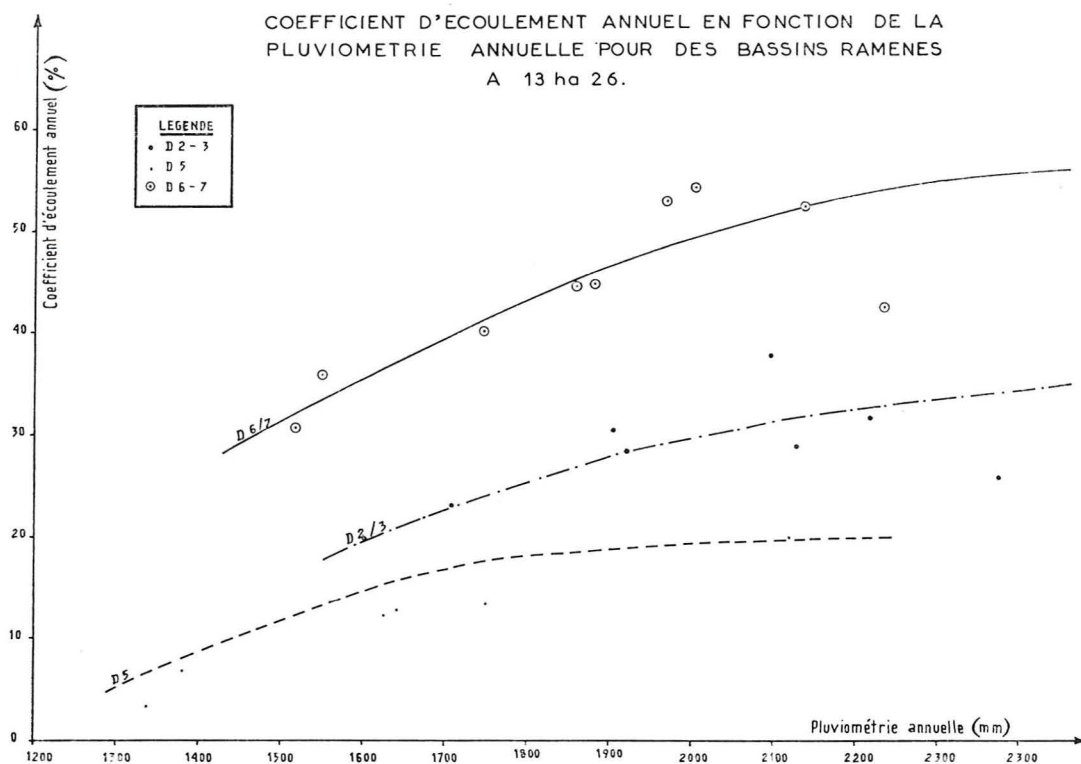


TABLEAU N° 14

Campagne	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
D2-3 Forêt ..	31,5	30,4	23,1	28,8	28,3	25,8	37,7	33,0	26,4
D5 <i>Eucalyptus</i>	13,6	7,1	3,6	12,7	12,9	12,9	20,0	20,2	13,5
D6-7 Savoka .	53,6	35,8	30,6	44,3	40,1	42,6	54,2	52,3	44,7

pluvieuse) seraient, pour un bassin de 13 ha : (voir fig. 26).

- - Forêts naturelle : 36 %.
- - *Eucalyptus* : 20 %.
- Savoka : 56 %.

Les équations de régression du débit total en fonction de la pluie sont les suivantes :

- D2-3 :  $Q = 0,410 P - 229$  ( $r = 0,773$ ).
- D5 :  $Q = 0,384 P - 397$  ( $r = 0,871$ ).
- D6-7 :  $Q = 0,873 P - 795$  ( $r = 0,905$ ).

Mais plus intéressante pour l'étude du bilan de l'eau est l'évolution de la quantité d'eau non restituée à l'exutoire (déficit d'écoulement) en fonction de la pluviométrie. Elle est mesurée par la différence entre pluviométrie et débit total. Elle

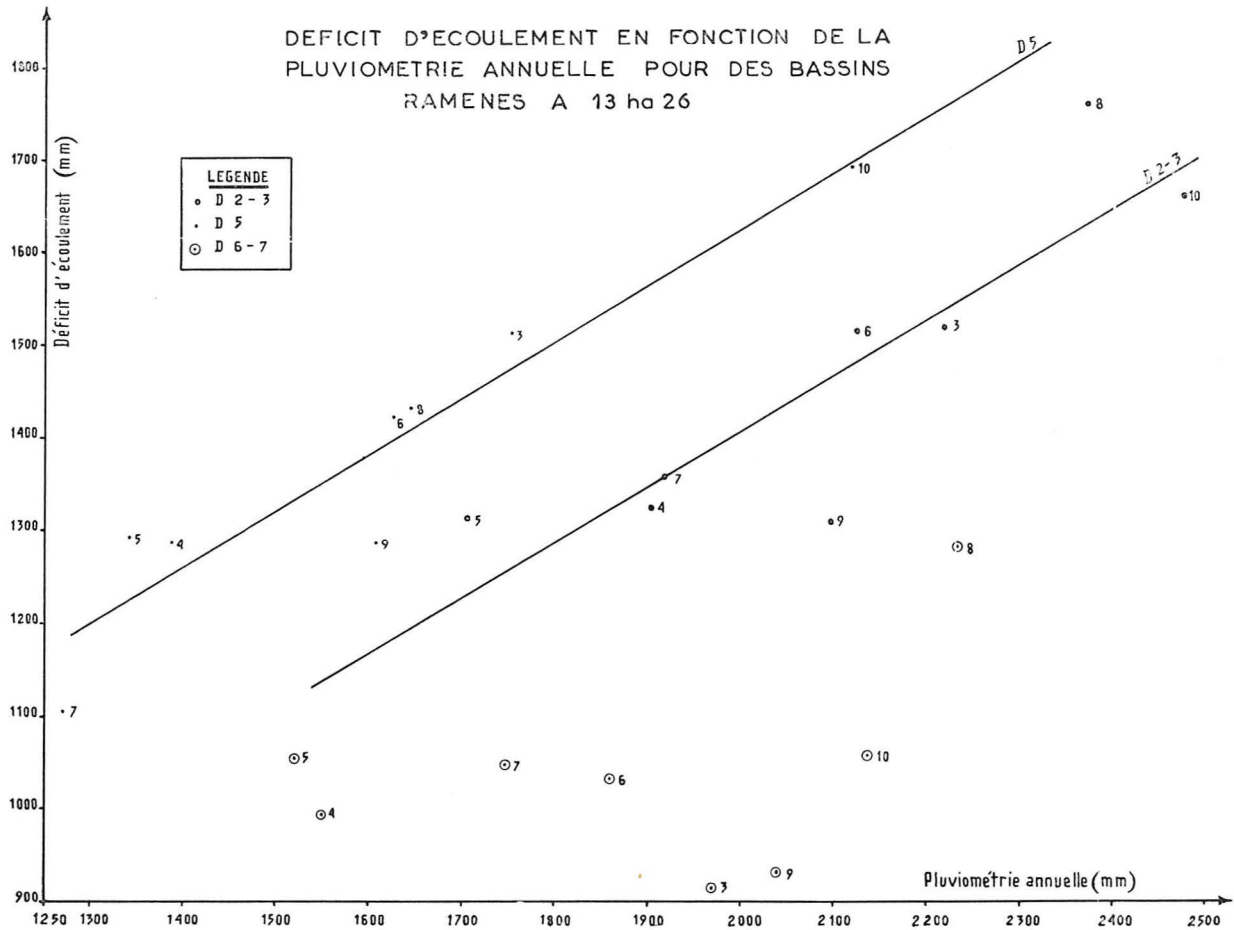
représente la somme de l'eau qui s'est infiltrée en profondeur (qui pour 13 ha, nous l'avons vu, est importante) et de l'eau évapotranspirée.

La corrélation déficit d'écoulement/pluie est très bonne pour D2-3 et D5. Si l'on note  $D =$  quantité d'eau non restituée on a :

- D2-3 :  $D = 0,589 P - 231$  ( $r = 0,868$ )
- D5 :  $D = 0,615 P - 398$  ( $r = 0,942$ ).

Les deux droites représentatives sont à peu près parallèles (fig. 27). Le fait que  $D$  augmente avec  $P$  serait dû à la part de l'eau qui disparaît en profondeur, part d'autant plus grande qu'il pleut davantage. Si l'on admet que cette part est la même pour les deux bassins, on en déduit que l'écart à peu près constant ( $398 - 231 = 167$  mm) qui sépare les

FIG. 27.



deux droites de régression représente la différence entre les quantités d'eau évapotranspirée par les deux couverts (*Eucalyptus* et forêt naturelle).

L'intervalle de confiance de cette valeur (167 mm) est difficile à estimer. Mais **on peut affirmer sans doute qu'une forêt d'*Eucalyptus* âgés consomme par an de 100 à 200 mm d'eau de plus qu'une forêt naturelle en équilibre.** Cette consommation supplémentaire peut avoir deux causes :

— L'évaporation directe (à travers la litière) serait plus grande sous couvert d'*Eucalyptus*. Ceci serait plausible, le couvert des *Eucalyptus* étant plus léger (feuilles étroites souvent disposées verticalement) donc l'insolation plus grande.

— La consommation d'eau par l'*Eucalyptus* serait plus grande que celle des arbres autochtones : ceci est possible également, la production de matière ligneuse de l'*Eucalyptus* étant très supérieure donc vraisemblablement aussi ses besoins en eau.

Pour D6-7, la corrélation eau non restituée/pluie est beaucoup moins bonne ( $r = 0,340$ ). La quantité d'eau non restituée à l'exutoire est presque constante chaque année et varie autour de 1.000-1.050 mm. Ceci peut s'interpréter ainsi : l'infiltration se fait moins bien dans le sol d'une savoka, l'eau en excédent qui tombe lors d'une année très pluvieuse donne lieu à un ruissellement et cette eau est donc rapidement restituée à l'exutoire.

#### INFLUENCE DU COUVERT SUR LA VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE DES DÉBITS.

Y a-t-il une influence, à l'échelle annuelle, du couvert sur la variabilité des débits, c'est-à-dire sur leur irrégularité ? Le tableau ci-dessous donne les coefficients de variation non réduite (CV) et réduite (CVR) en tenant compte de la corrélation avec la pluviométrie annuelle calculée à partir des huit campagnes 1964/65 à 1971/72 (coefficient de variation = écart-type réduit divisé par la moyenne en %).

Les coefficients de variation du débit propre des crues sont du même ordre pour tous les bassins, et sont assez élevés (coefficient de variation réduit de l'ordre de 50 %) ce qui signifie que le débit passant sous forme de crues varie beaucoup d'une année à

l'autre et autant sous couvert boisé que sous couvert de broussailles (Le fait de savoir si ces crues sont de même nature sera envisagé dans la suite de l'étude).

Le couvert forestier ne réduit donc pas les variations interannuelles de débit. Le couvert d'*Eucalyptus* augmenterait même ces variations ; ceci est possible dans la mesure où les *Eucalyptus*, par leur évapotranspiration accrue, diminueraient le débit du cours d'eau de D5 ; celui-ci n'étant jamais très fort devient très faible pendant les années sèches (100 mm de lame d'eau écoulée en 1965-66, 50 mm en 1966/67) et les variations relatives entre années deviennent plus fortes. Mais les variations absolues du débit annuel sont du même ordre de grandeur d'un bassin à un autre. Entre 1966/67, année du moins grand débit, et 1964/65 ou 1971/72, années de fort débit, la différence est :

de 409 à 433 mm pour Ampangalatsary  
379 mm pour Betsakotsako  
646 mm pour D6 et 598 mm pour D7  
(Marolaona).

Ainsi on peut affirmer que la couverture influe nettement sur le coefficient d'écoulement et le déficit d'écoulement mais semble ne pas jouer sur la variabilité inter-annuelle des débits.

#### ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DES DÉBITS (Etude à l'échelle mensuelle).

On a procédé au calcul des moyennes mensuelles (sur huit campagnes à partir de 1964/65) des données suivantes :

- Hauteur d'eau précipitée,
- Hauteur d'eau ruisselée sous forme de débit permanent,
- Hauteur d'eau ruisselée sous forme de crues,
- Hauteur d'eau ruisselée totale.

Ces moyennes ont été établies pour trois bassins versants seulement, un par type de couvert, à savoir : D4, D5 et D7. L'évolution serait analogue pour les bassins versants d'un même couvert, compte non tenu de l'effet d'échelle.

Les résultats sont présentés sous la forme de trois graphiques. Voir figures 28-29-30.

TABLEAU N° 15.

Bassin Versant	Pluie	Débit permanent total		Débit propre des crues		Débit total	
	CV	CV	CVR	CV	CVR	CV	CVR
D1.....	12,4	26,1	19,0	83,3	57,7	29,0	18,2
D2.....	12,5	19,3	14,8	69,6	43,8	22,3	14,6
D3.....	11,6	17,9	13,8	62,1	49,9	20,4	15,4
D4.....	11,3	16,0	12,2	78,6	53,8	17,2	12,2
D5.....	17,0	47,6	28,9	94,0	49,8	55,7	29,5
D6.....	14,2	25,7	13,1	75,0	49,0	31,1	13,8
D7.....	13,7	21,9	14,4	77,4	52,3	28,1	14,7

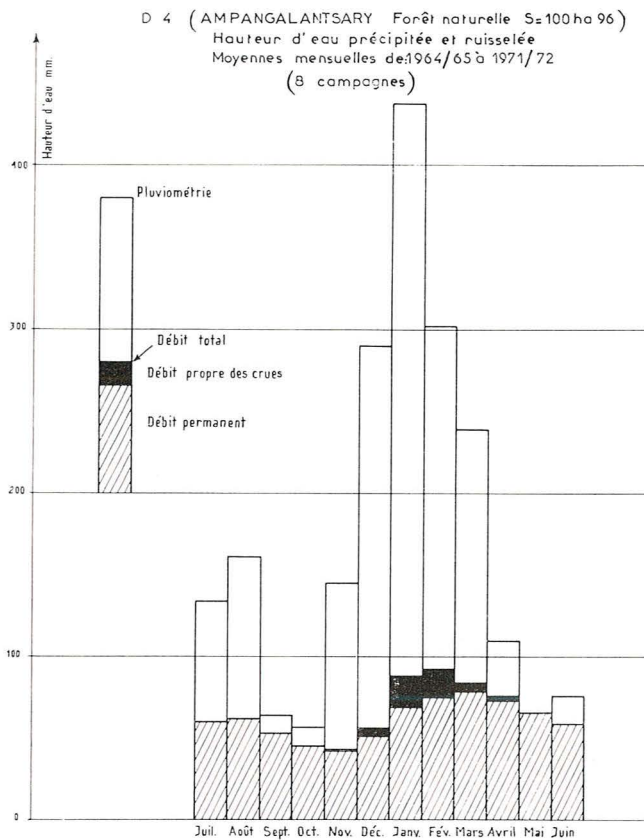


FIG. 28.

Le commentaire en sera bref :

— Pluviométrie :

On retrouve l'allure du diagramme de pluie donné dans les généralités sur le climat d'Analamazaotra. On retrouve aussi les écarts de pluviométrie notés d'un bassin à un autre. On peut observer que les écarts sont répartis entre tous les mois de l'année.

— Débit permanent :

Ses fluctuations sont beaucoup moindres que celles de la pluviométrie. Ceci est évidemment dû à l'effet « tampon » de l'eau contenue dans le sol et dont l'écoulement est différé. On observe même pour D4 un mois (mai) où la quantité d'eau écoulée est légèrement supérieure à la quantité d'eau précipitée. Pour D7, ce même mois, les deux quantités sont exactement égales.

Le débit permanent varie plus sur D7 que sur D4, ce qui ne nous étonne pas (rétention supérieure de l'eau par un sol forestier). Le débit permanent de D5 est faible, ce qui est dû à la fois à la faible surface de D5, à la plus forte consommation des *Eucalyptus* (12 mm par mois de plus en moyenne que la forêt naturelle) et a déjà été signalé.

— Débit de crue.

Les crues sont bien plus importantes sur D7 que sur D4, ce qui est déjà connu. Les crues sont relativement importantes sur D5, ceci a déjà été mentionné.

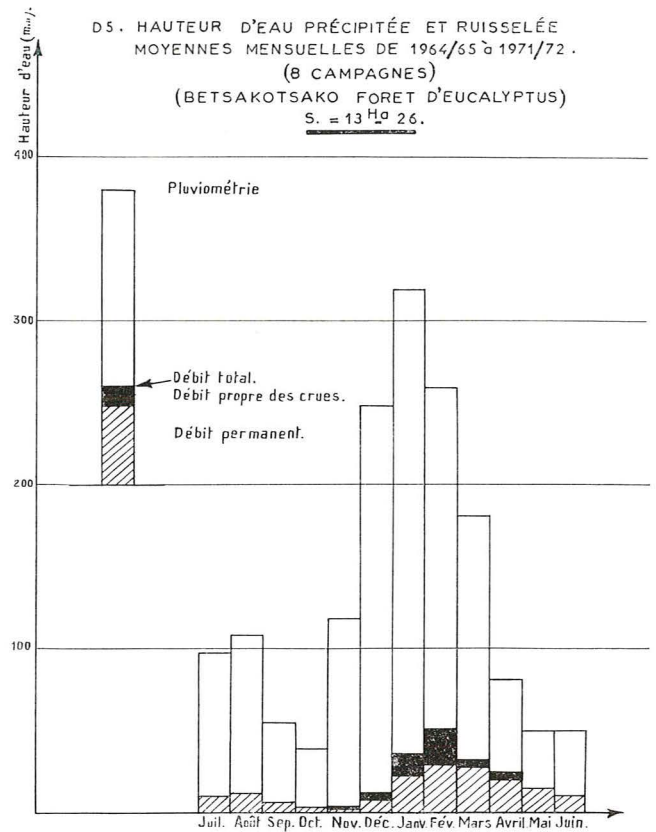
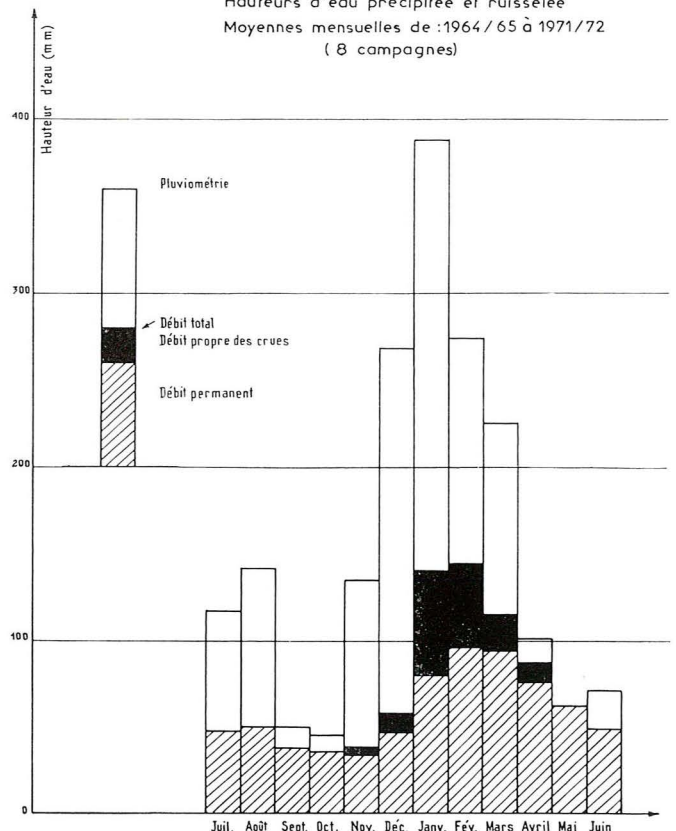


FIG. 29.

FIG. 30.

D7 (MAROLAONA SAVOKA S= 31,50ha)  
Hauteurs d'eau précipitée et ruisselée  
Moyennes mensuelles de : 1964/65 à 1971/72  
(8 campagnes)



PLUIES CLASSEES ET CUMULEES  
EN FONCTION DE LA HAUTEUR PRECIPITEE  
BASSINS D 4, D 5, D 7.

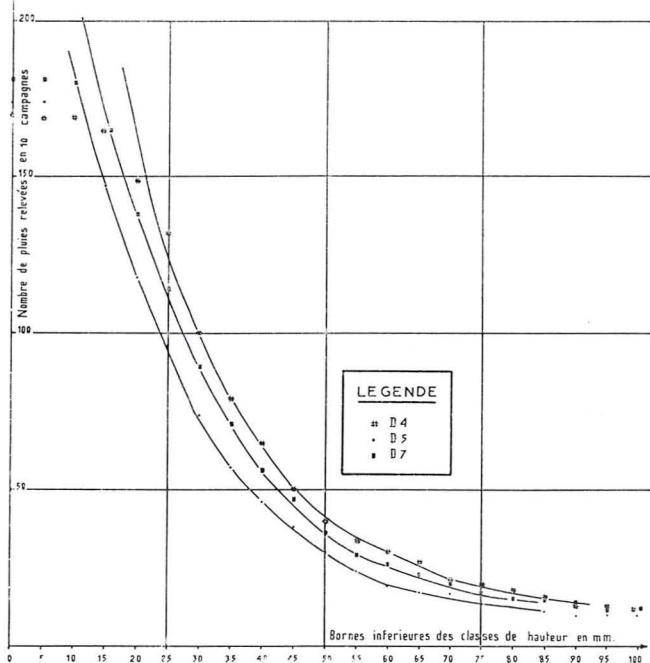


FIG. 31.

PLUIES CLASSEES ET CUMULEES  
EN FONCTION DE LA HAUTEUR PRECIPITEE  
BASSINS D 3, D 6.

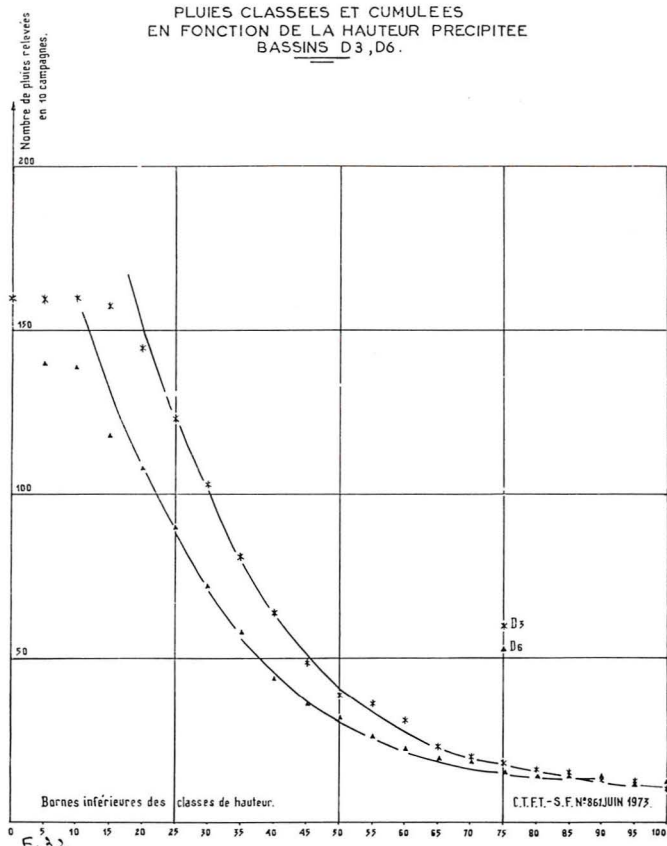


FIG. 32.

— Débit total.

Il est la somme des deux précédents. Remarquons seulement que le débit total est toujours un peu plus grand en février qu'en janvier, alors que le mois le plus arrosé est toujours et nettement le mois de janvier, ceci est encore un effet dû aux réserves du sol.

#### COMPARAISON DES RUISSELLEMENTS JOURNALIERS.

Pluies classées en fonction de la hauteur (fig. 31 et 32).

Les trois courbes de D4, D5 et D7 sont étagées, ceci résulte de ce que les pluviométries reçues par ces trois bassins sont différentes (voir première partie) et non pas (ou du moins très peu) d'un effet d'échelle. Celui-ci n'a *a priori* aucune raison de jouer, on a cependant comparé les pluies reçues par les quatre bassins d'Ampangalatsary depuis 1964-65 qu'on a classées et cumulées. On a obtenu le tableau ci-dessous :

TABLEAU N° 16.

Classe	D1	D2	D3	D4
> 0	148	228	137	144
> 5	148	228	137	143
> 10	147	207	137	143
> 15	136	177	135	139
> 20	121	144	122	125
> 25	94	113	102	109
> 30	81	89	84	85
> 35	62	66	64	66
> 40	48	53	50	54
> 45	38	37	39	43
> 50	30	30	30	33
> 55	26	26	27	27
> 60	22	22	23	24
> 65	18	20	21	21
> 70	13	15	13	15
> 75	12	13	11	14
> 80	9	10	10	12
> 85	9	9	9	11
> 90	9	8	8	9
> 95	8	8	8	9
> 100	6	6	6	8

A partir des pluies supérieures à 30 mm, tous ces bassins sont très comparables. Même en tenant compte du fait que ces pluviométries ne sont pas indépendantes (les mêmes pluviomètres servent dans le calcul des pluies moyennes) on en conclut que l'effet d'échelle ne joue pas sur la pluviométrie. Le fait qu'on ait beaucoup plus de pluies faibles (inférieures à 20 mm) ayant occasionné des crues sur D2 que sur les autres bassins versants s'expliquerait par la plus grande sensibilité de la station de jaugeage de D2 aux petites crues (déversoir de type H 2 pieds) donc aux pluies faibles.

Le tracé des courbes de D3 et D6 sur un autre graphique (pour ne pas surcharger la figure)



Grand bassin versant de Périnet. Déversoir D5 à Betsakotsako.

conduit aux mêmes conclusions, bien que D6 semble avoir reçu moins de pluies que les autres bassins versants.

De ces courbes, on a tiré le nombre de pluies (ayant provoqué une crue) supérieures à une hauteur donnée en année moyenne. On peut difficilement tirer de ces courbes mieux que les hauteurs des pluies qui sont dépassées deux fois par an. Les pluies de périodes de retour plus longues doivent être calculées par des moyens différents.

TABLEAU N° 17.

Hauteur de pluie dépassée  $n$  fois en une année moyenne (mm)

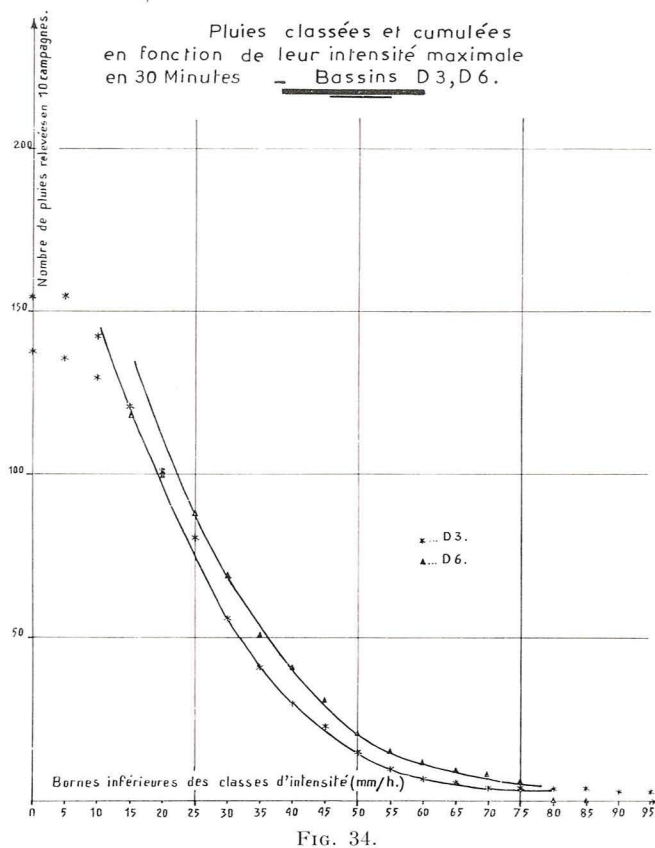
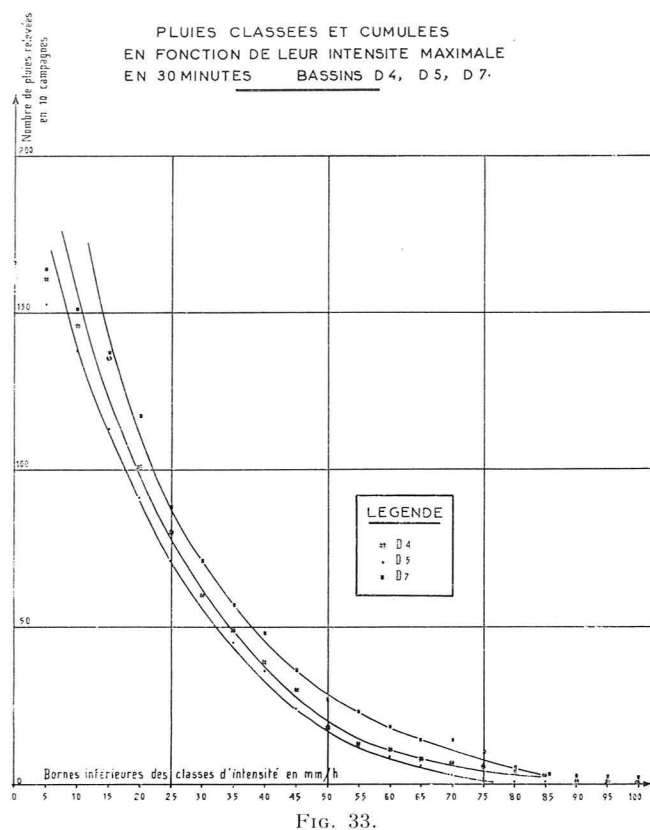
B. V. \ n	15	10	5	2
D3 forêt . . . . .	20	30	44,5	70
D4 forêt . . . . .	14,5	30	45	74
D5 <i>Eucalyptus</i> . . . . .	21,5	29	48	58,5
D6 Savoka . . . . .	12	22	38	62,5
D7 Savoka . . . . .	17,5	27,5	42,5	68

On peut aussi tirer de ces courbes une évaluation de la hauteur minimale des pluies provoquant une crue. Deux remarques préalables sont à faire.

1. — Il est évident que, lorsqu'une pluie tombe, la formation ou la non-formation d'une crue dépendra pour une grande part de l'humidité préalable du sol, mais ce facteur disparaît quand on relève les pluies de 10 années car on ajoute des pluies tombées sur des sols d'humidités différentes. Par ailleurs, en prolongeant les courbes de façon logique pour les hauteurs de pluie inférieure à 20 mm, on réduit l'écart entre pluies ayant eu lieu et pluies comptabilisées.

2. — La hauteur minimale de pluie provoquant une crue dépend de la possibilité que l'on a d'observer cette crue, donc de la sensibilité de la station de jaugeage. On admettra, au vu des limnigrammes des différents bassins versants que les sensibilités des stations de jaugeage de D3, D4, D6 et D7 sont à peu près équivalentes.

Notons bien que nous appelons « Crue » toute élévation du niveau de l'eau dans le cours d'eau se traduisant par un accident dans le tracé du limnigramme. Des élévations lentes et continues du niveau de l'eau ne seront pas considérées comme crues. Par contre, une élévation faible mais se propageant sous forme d'une onde de crue donnera lieu à un accident observable sur le limnigramme et sera comptée comme crue.



Ceci admis, on détermine graphiquement la hauteur des « pluies minimales » provoquant une crue par intersection de la courbe des averses classées et cumulées avec la parallèle à l'axe des abscisses d'ordonnée égale aux effectifs maximaux (effectifs des 2 ou 3 premières classes ; pluies inférieures à 15 mm).

Les pluies minimales ainsi établies sont les suivantes :

- D3 : 18 mm forêt,
- D4 : 19 mm forêt,
- D5 : 11 mm *Eucalyptus*,
- D6 : 14 mm Savoka,
- D7 : 13 mm Savoka.

On note la bonne concordance des bassins versants d'un même ensemble (D3 et D4 d'une part, D6 et D7 d'autre part) et on en tire la conclusion suivante.

**Il faut une plus grande hauteur de pluie pour provoquer une crue quand la pluie tombe sur une forêt naturelle que quand elle tombe sur un couvert broussailleux.**

Il semblerait par contre, d'après le chiffre que nous avons, que les crues sont produites par des pluies assez faibles sous le couvert d'*Eucalyptus*. Comme ce chiffre n'a été établi que pour un seul bassin versant sans vérification possible, cette affirmation doit être assez réservée.

Remarquons aussi que les hauteurs des « pluies minimales » sont, pour D3 et D6, assez proches des hauteurs dépassées par quinze pluies seulement ; pour D4, cette pluie minimale ne serait même pas dépassée quinze fois. Ceci montre qu'en année moyenne il peut y avoir sur certains bassins versants moins de quinze crues notables.

Une dernière conclusion est à tirer de l'examen des figures 31 et 32 : on observe nettement pour tous les bassins versants une légère irrégularité dans les courbes aux alentours des hauteurs de pluies comprises entre 50 et 65 mm. Nous interprétons cela en pensant que l'on a affaire à deux « populations » de pluies distinctes : les averses de type tropical, de durée assez limitée, qui constituent la majeure partie des pluies de hauteur inférieure à 60 mm, et les pluies cycloniques moins intenses mais beaucoup plus longues (souvent plus d'une journée) qui représentent les pluies de hauteur supérieure à 60 mm. La superposition de ces deux types de pluies assez distincts est une gêne légère dans l'étude des correspondances entre pluies et crues résultantes.

**Pluies classées en fonction de leur intensité maximale en 30 mn (fig. 33 et 34).**

Les courbes sont légèrement étagées, mais ceci est dû sans doute seulement au fait que toutes les pluies n'ont pu être dénombrées.

FIG. 35.

D'après ces courbes on voit qu'il n'y aurait en moyenne que cinq pluies par an ayant une intensité supérieure à 30 mm/h pendant une demi-heure.

**Ruissellements classés en fonction de leur hauteur.**

Les courbes sont très explicites (fig. 35 et 36) : sur les bassins versants couverts de savoka, les forts ruissellements sont beaucoup plus nombreux, on observe encore l'allure ondulée des courbes pour les hauteurs de ruissellement comprises entre 6 et 9 mm ; c'est là sans doute que se fait le passage des ruissellements provoqués par des averses courtes à celui des ruissellements dus à des pluies cycloniques. De ces courbes on a tiré le tableau suivant, donnant la hauteur ruisselée (en mm) qui est en moyenne dépassée n fois par an.

TABLEAU N° 18.

Lame d'eau ruisselée (mm) lors d'une crue dépassée n fois en une année moyenne.

B. V. \ n	15	10	5	4	3	2
D3 forêt . . . . .	0,2	0,8	1,9	2,4	3,1	5,0
D4 forêt . . . . .	0,4	0,7	2,0	2,4	3,0	4,5
D5 Eucalyptus . . . . .	0,4	0,6	1,6	2,0	2,6	3,7
D6 Savoka . . . . .	0,6	0,8	2,8	4,1	6,1	11,5
D7 Savoka . . . . .	0,5	1,2	4,6	6,2	9,6	16,0

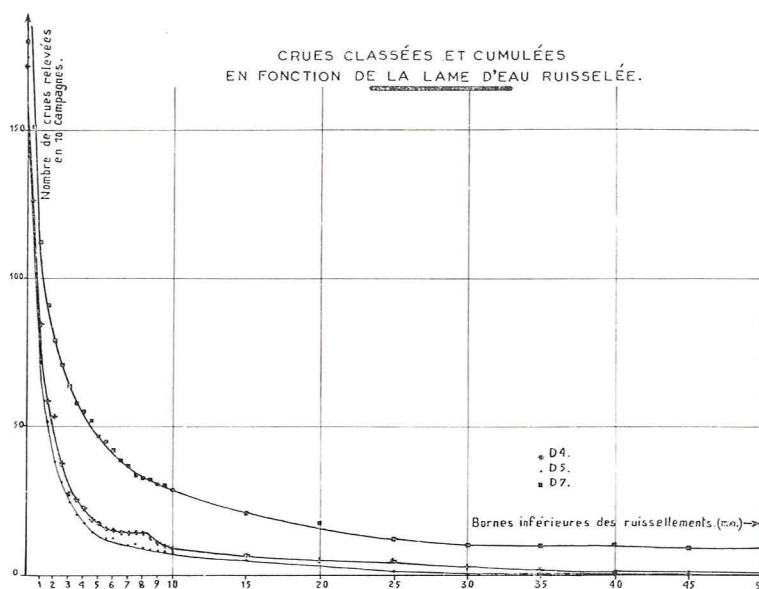
Les ruissellements sont très comparables sur D3 et D4. Par contre, ils sont plus faibles sur D6 que sur D7 mais ils restent cependant nettement supérieurs à ceux de D3 et D4.

L'influence du couvert forestier (Eucalyptus ou forêt naturelle) dans la limitation des ruissellements est donc clairement démontrée.

**Ruissellements classés en fonction de leur coefficient de ruissellement (fig. 37 et 38).**

Ces courbes, construites sur le même principe que les courbes précédentes, apportent peu de rensei-

CRUES CLASSÉES ET CUMULÉES EN FONCTION DE LA LAME D'EAU RUISSELÉE.



gnements nouveaux. Elles confirment cependant très nettement que les bassins versants couverts de savoka se distinguent des bassins versants forestiers par des coefficients de ruissellement plus élevés. Elles montrent également que les coefficients de ruissellement varient énormément (de 0 à plus de 60 %) mais que l'on n'atteint pas sur ces bassins versants les valeurs très élevées du coefficient de ruissellement atteintes sur des parcelles élémentaires. Ce que nous savons déjà.

Il y a, en effet, entre un bassin versant et une parcelle élémentaire une différence considérable qui vient du temps de parcours de l'eau qui ruisselle : l'eau tombée sur les parties les plus éloignées de l'exutoire d'un bassin versant met beaucoup plus longtemps à parvenir à la station de jaugeage et :

CRUES CLASSÉES ET CUMULÉES EN FONCTION DE LA LAME D'EAU RUISSELÉE.

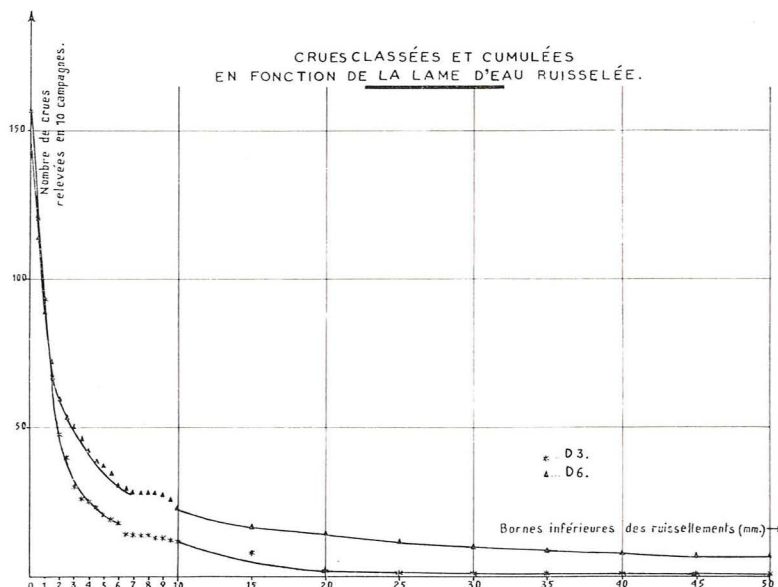


FIG. 36.





Grands bassins de Périnet.  
Ampangalatsary. Déversoir D3.

— soit s'écoulant de façon retardée, ne sera pas comptabilisée dans la crue ;  
— soit même sera évaporée avant d'arriver à l'exutoire et perdue pour le bassin versant.

Si l'on se réfère encore aux chiffres de l'année moyenne obtenus en divisant par 10 les effectifs cumulés de nos dix campagnes on voit que le coefficient de ruissellement dépassé 5 fois

en cette année moyenne est :

- 5,2 % pour D3
- 4,4 % — D4
- 4,4 % — D5
- 8,0 % — D6
- 10,6 % — D7

#### Débîts maximaux de crue.

L'étude des vingt plus grands débits spécifiques de chaque crue relevés à partir des limnigrammes n'a pas permis une exploitation statistique (en particulier elle souffre du fait qu'on ne note qu'un débit maximum par crue alors qu'une crue peut présenter deux pics accusés).

A titre indicatif, les débits classés trentièmes seraient :

- D3 : 2,72 l/s × ha
- D4 : 1,85 l/s × ha
- D5 : 2,32 l/s × ha
- D6 : 7,66 l/s × ha
- D7 : 7,54 l/s × ha

On ne peut tirer de renseignements statistiques que de la liste classée des valeurs maximales annuelles des débits instantanés de crue. Cette liste est donnée ci-après, avec indication de la campagne correspondante (donnée par son numéro).

De haut en bas :

FIG. 37.

FIG. 38.

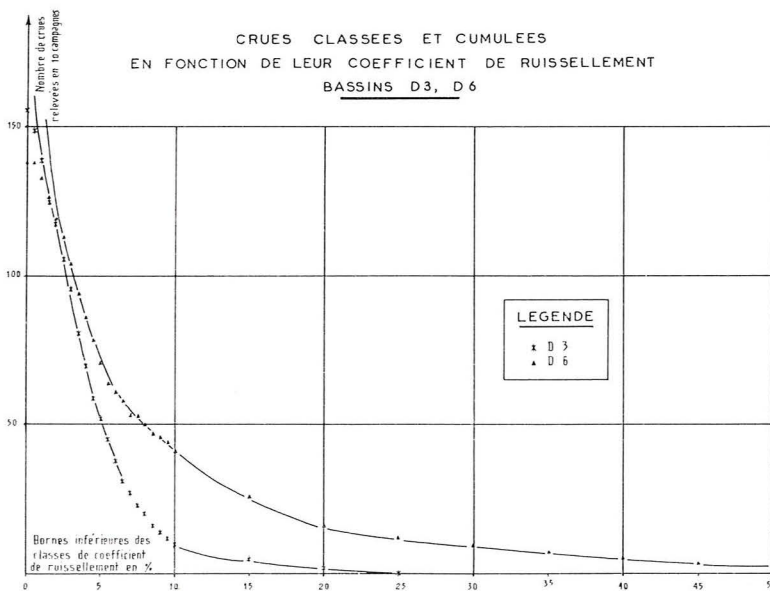
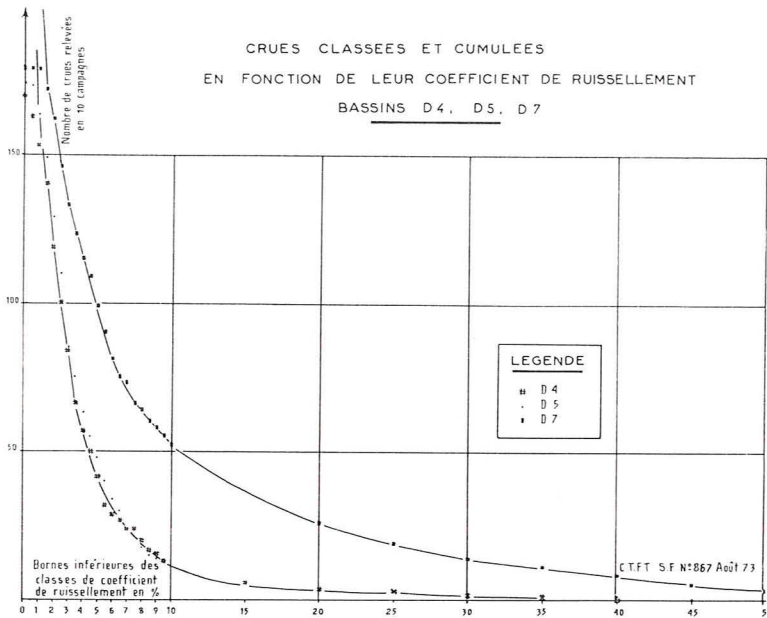


TABLEAU N° 19.

VALEURS MAXIMALES ANNUELLES DES DÉBITS SPÉCIFIQUES INSTANTANÉS (en l/s × ha)

Rang n	n/11	D3		D4		D5		D6		D7	
1	0,091	52,8	10	61,8	2	79,5	10	117,5	2	121,8	10
2	0,182	46,2	2	60,1	10	64,0	2	61,3	10	107,2	2
3	0,273	12,9	8	15,6	8	15,3	9	45,7	6	37,5	8
4	0,364	12,7	4	13,5	1	8,19	1	38,4	9	36,7	9
5	0,454	12,1	3	8,78	3	8,19	7	37,0	1	33,6	1
6	0,545	11,7	1	7,88	9	6,63	5	35,5	8	31,0	6
7	0,636	7,12	9	5,23	6	4,73	3	21,0	3	25,0	7
8	0,727	6,4	7	5,29	7	3,72	8	18,0	5	21,9	3
9	0,818	4,9	6	3,71	4	3,55	4	6,26	4	11,2	5
10	0,909	1,69	5	1,80	5	3,05	6	4,69	7	3,17	4

On a pris comme fréquence au dépassement  $\frac{n}{N+1}$ , formule qui entraîne moins de distorsion que  $\frac{n-1}{N}$ . L'ajustement ne peut cependant être que très imprécis en raison du faible nombre de données dont on dispose. On n'a d'ailleurs pas tenté d'ajustement à une loi théorique, on s'est contenté de représenter les 10 points correspondant à chaque bassin sur du papier Gaussien normal (fig. 39).

L'ajustement graphique d'une courbe est assez délicat du fait que les deux plus grands débits (correspondant à des pluies exceptionnelles du 14.2.72 ou du 16.12.63) sont nettement supérieurs au débit classe 3 (1).

Les courbes sont d'allure hypernormale, ce qui est logique. Elles sont cependant sans doute trop relevées, en raison du fait signalé précédemment (bien qu'on ait essayé de ne pas trop « creuser » les courbes) car leur prolongation donnerait un débit centenaire vraiment considérable.

On s'est donc contenté de tirer de ces courbes le débit médian et le débit décennal fort ramenés à l'hectare, en indiquant que cette estimation du débit décennal est peut-être exagérée (ceci est de toute façon préférable).

TABLEAU N° 20. — Débits en l/s × ha

	D3	D4	D5	D6	D7
Crue médiane . . . . .	6,5	9	6	32	29
Crue décennale . . . . .	68	87	95	110	145

REPARTITION STATISTIQUE DES VALEURS MAXIMALES ANNUELLES DES DÉBITS SPÉCIFIQUES INSTANTANÉS DE CRUE.

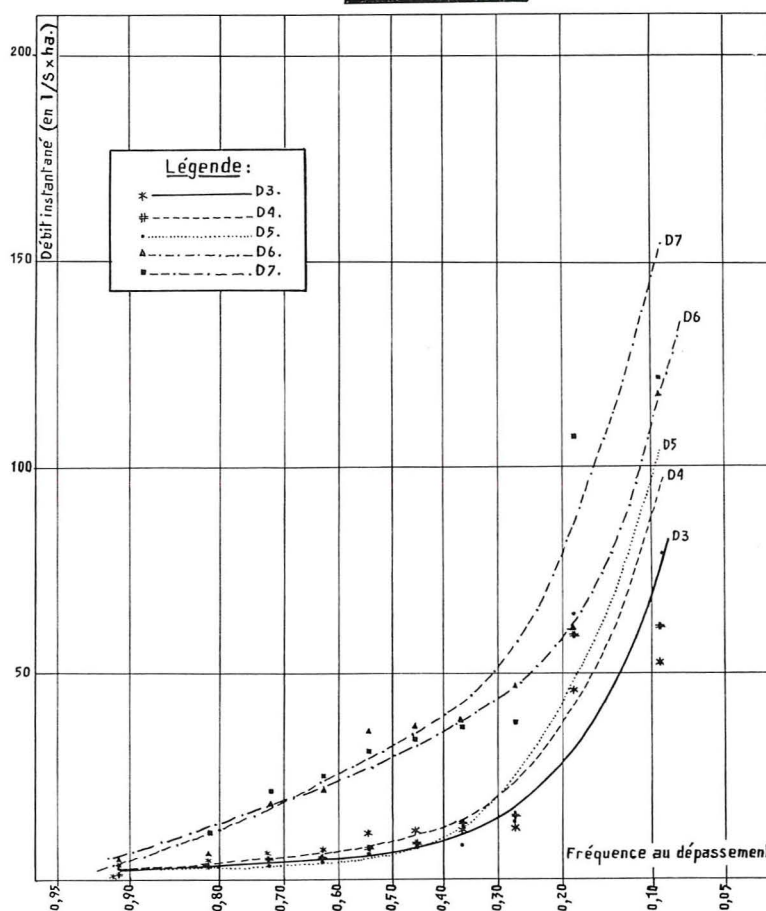


FIG. 39.

Y a-t-il un effet d'échelle sur les débits spécifiques maximaux ? Nous avons vu dans la première partie du rapport que l'effet d'échelle ne jouait pas, ou très

(1) Remarque : On sait maintenant que la période 1962-1969 a été une période sans fortes crues sur l'ensemble de Madagascar, ce qui explique ce fait.



*Grands bassins de Périnet. Déversoir D4 à Ampangalatsary.*

peu, sur le volume des crues. Mais il pourrait jouer sur les débits. D'après nos courbes, le débit augmenterait avec la surface. En fait, il n'est pas possible que cette tendance continue longtemps, car lorsque la surface augmente, un laminage de la crue se produit qui explique que les valeurs des crues exceptionnelles des très grands bassins soient, ramenées à l'ha, inférieures à celles que nous avons trouvées.

D'ailleurs on peut noter :

a) que les plus forts débits se sont produits pendant la campagne 10 pour D3 et D7, pendant la campagne 2 pour D4 et D6, ce qui prouve le caractère en partie aléatoire des valeurs des crues fortes,

b) que le plus fort débit du 14.2.72 (campagne n° 10) est de :

81,9 l/s × ha sur D1  
 47,3 l/s × ha sur D2  
 52,8 l/s × ha sur D3  
 60,1 l/s × ha sur D4

L'effet d'échelle, s'il existe est difficile à percevoir sur les débits extrêmes par cette méthode.

Pour s'en tenir à des résultats simples, nous pensons que pour des bassins versants d'une sur-

face comprise entre 10 et quelques centaines d'ha, la valeur de la crue décennale est :

90 l/s × ha pour un bassin boisé,  
 150 l/s × ha pour un bassin versant couvert de broussailles.

Le rôle modérateur du couvert forestier sur les crues apparaît nettement et est loin d'être négligeable.

#### **Coefficient de ruissellement maximum en fonction de la hauteur précipitée.**

On a tracé les courbes enveloppes des coefficients de ruissellement maximum ( $K_{rx}$ ) en fonction des précipitations ( $p$ ).

On peut estimer que ces courbes varient linéairement jusqu'à une valeur maximum qui est celle que l'on rencontre pour les crues les plus fortes.

Les équations de ces courbes sont les suivantes :

D2 :  $K_{rx} = 0,09 p + 6,6$   
 D3 :  $K_{rx} = 0,13 p + 4,4$   
 D4 :  $K_{rx} = 0,17 p + 1,9$   
 D5 :  $K_{rx} = 0,09 p + 6,7$   
 D6 :  $K_{rx} = 0,27 p + 6,7$   
 D7 :  $K_{rx} = 0,40 p + 13,0$

Le coefficient de ruissellement « maximum maximum » a été fixé, en fonction des plus fortes valeurs observées à :

- 20 % pour D2
- 24 % — D3
- 35 % — D4
- 32 % — D5
- 63 % — D6
- 66 % — D7

(Pour D5, le coefficient de ruissellement limite est difficile à préciser : on a atteint 43,7 % lors d'une pluie cyclonique exceptionnelle (221 mm) (8-9.3.1964) par contre, on n'a eu que 36 % environ pour une pluie de 358 mm (13-15.2.1972) ; on a pris 32 % comme coefficient de ruissellement limite, mais ce chiffre est très imprécis.)

Le fait que les coefficients de ruissellement de D6 soient inférieurs à ceux de D7 pourrait s'expliquer par l'état différent du couvert. Sur D6, en effet, la savoka est plus ancienne et on y trouve même vers le sommet, des *Eucalyptus* d'une quinzaine d'années formant un peuplement fermé. Les coefficients de ruissellement de D6 se rapprocheraient donc un peu de ceux observés pour les bassins boisés.

En définitive et pour se placer dans les conditions du ruissellement le plus fort, nous proposons les valeurs suivantes du coefficient de ruissellement maximum en fonction de la hauteur précipitée :

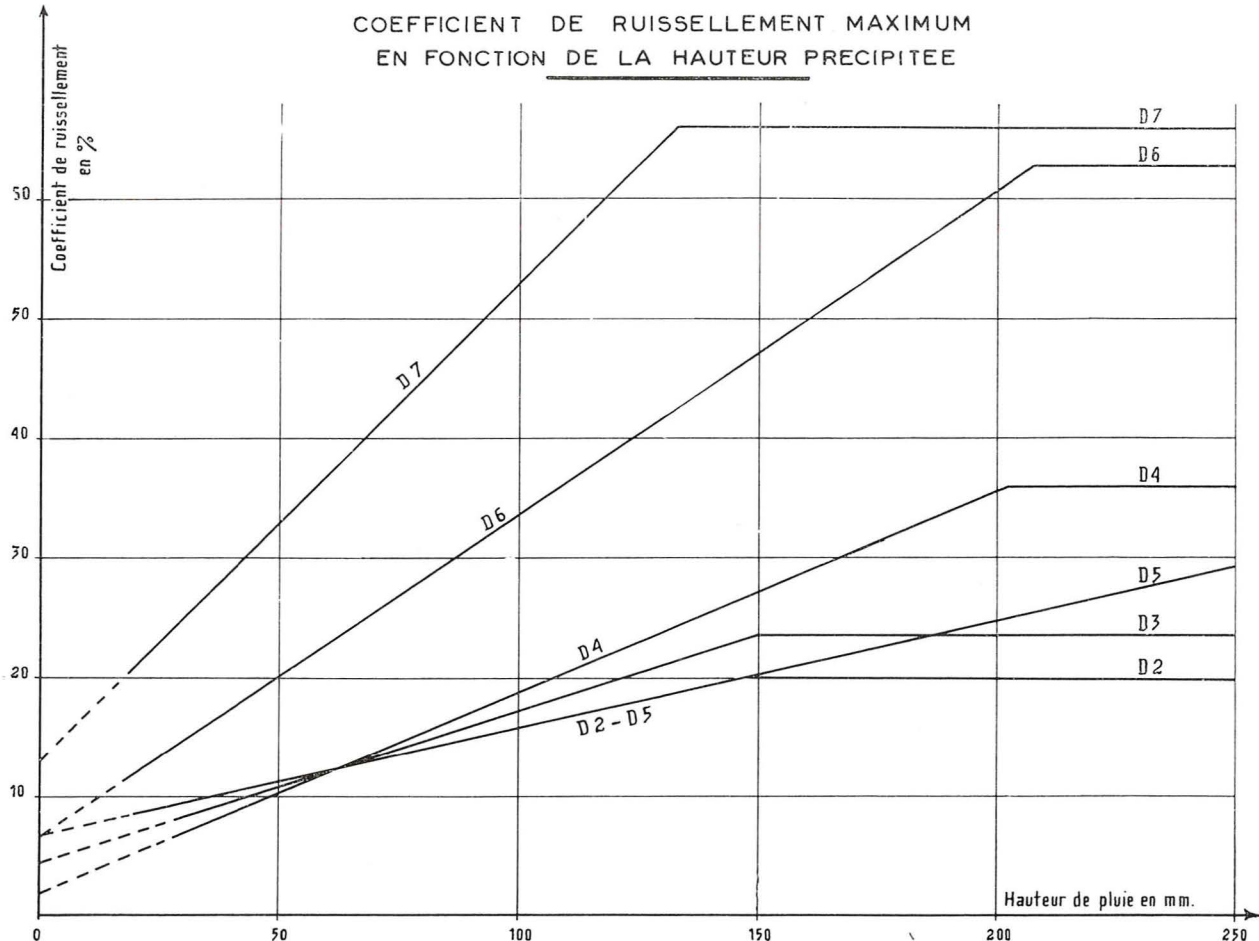
- Cas d'un bassin versant boisé :  
pluie inférieure à 200 mm :  $K_{rx} = 0,17 p + 2$ ,  
pluie supérieure à 200 mm :  $K_{rx} = 36 \%$ .
- Cas d'un bassin versant couvert de savoka :  
pluie inférieure à 130 mm :  $K_{rx} = 0,40 p + 13$ ,  
pluie supérieure à 130 mm :  $K_{rx} = 65 \%$ .

Signalons que ces valeurs sont supérieures aux valeurs maximales estimées par MM. PELTIER et BONNENFANT (1), qui sont, pour un sol imperméable et une pente moyenne de bassin supérieure à 10 % :

- Grande forêt primaire (cas d'Ampangalatsary) : 26 %.
- Forêt ordinaire en futaie, taillis dense avec sous-bois feuillus (cas de Betsakotsako) : 31 %.

(1) Cité dans : B. C. E. O. M. « Etude d'une méthode de calcul des débouchés à donner aux petits ouvrages d'art à Madagascar » 1967.

FIG. 40.



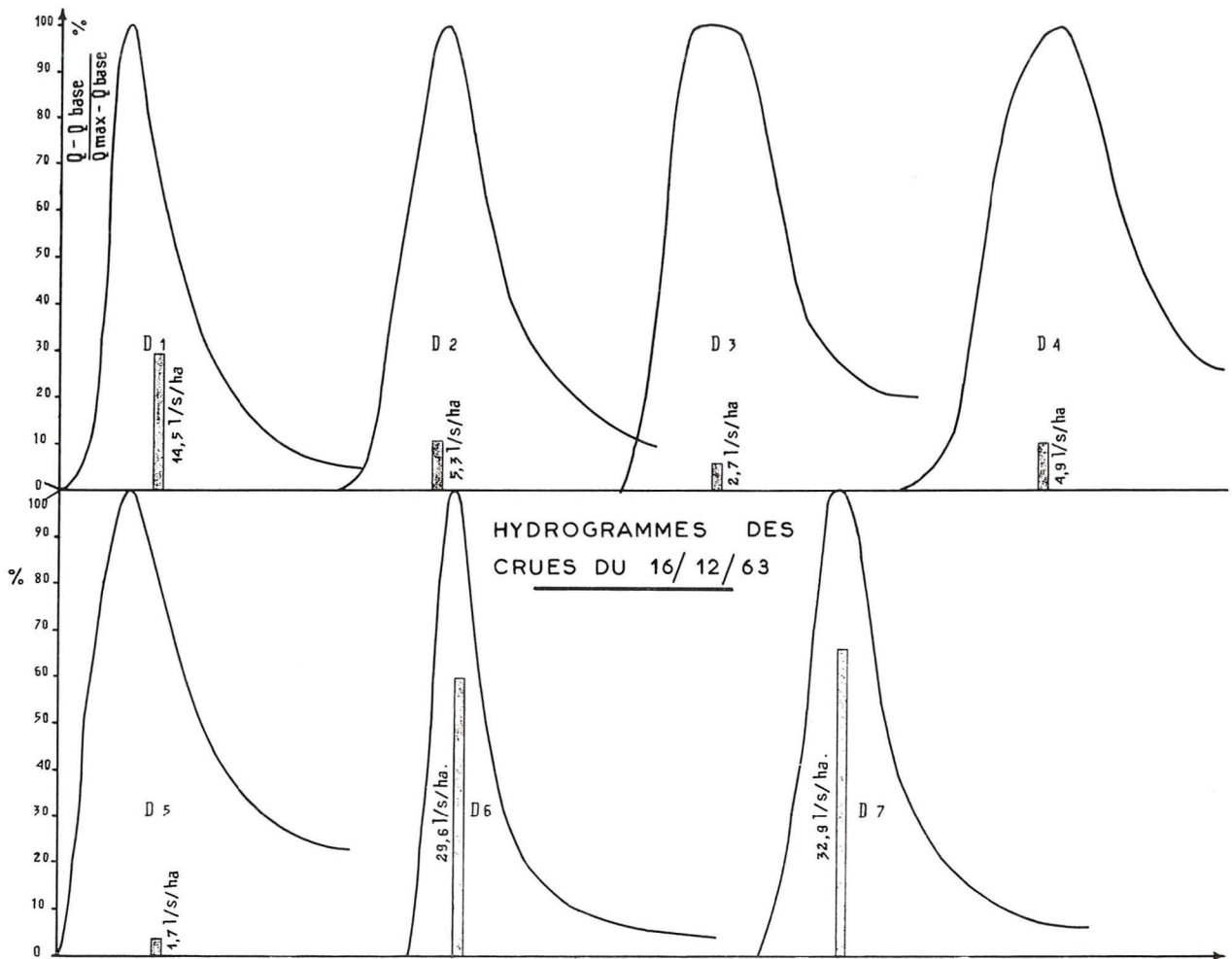


FIG. 41.

— Prairies, brousse dense, savane à sous-bois, taillis dense (cas de Marolaona) : 52 %.

(Le reste du tableau donne : terrains de parcours, petite brousse clairsemée, etc... : 86 % Terrains dénudés, labours frais, etc... : 92 %).

Les valeurs du coefficient de ruissellement que nous avons proposées doivent permettre une évaluation du ruissellement maximum à attendre d'une pluie donnée. Il faut noter qu'elles correspondent au cas d'une pluie tombant sur un sol déjà gorgé d'eau par une pluie importante tombée auparavant (au plus 24 h avant).

#### ÉTUDE DES HYDROGRAMMES DE CRUES SIMPLES ET DES PARAMÈTRES DE CRUE.

Nous allons tenter de dégager, d'après l'examen des limnigrammes de crues présentant les allures les plus régulières possibles, quelques-unes des caractéristiques des hydrogrammes de crues, telles que :

— Temps de réponse,

— Temps de montée,

— Débit de pointe en fonction du volume ruisselé, etc...

Cette étude sera faite uniquement pour essayer de voir l'influence du couvert sur la forme des crues, il ne s'agira pas d'appliquer en détail toute la théorie de l'hydrogramme unitaire à des bassins particuliers, celle-ci étant d'une application délicate pour les petits bassins versants. Le but de cette étude est surtout de faire apparaître quelle peut être l'influence du couvert naturel.

#### Comparaison de quelques hydrogrammes simples.

On a sélectionné huit crues, choisies pour la simplicité de leur forme et pour leur (relative) importance. Ce sont celles des jours suivants :

21. 3.1963	
18. 4.1963	
16.12.1963	1 <sup>re</sup> crue
16.12.1963	2 <sup>e</sup> crue
8.01.1965	

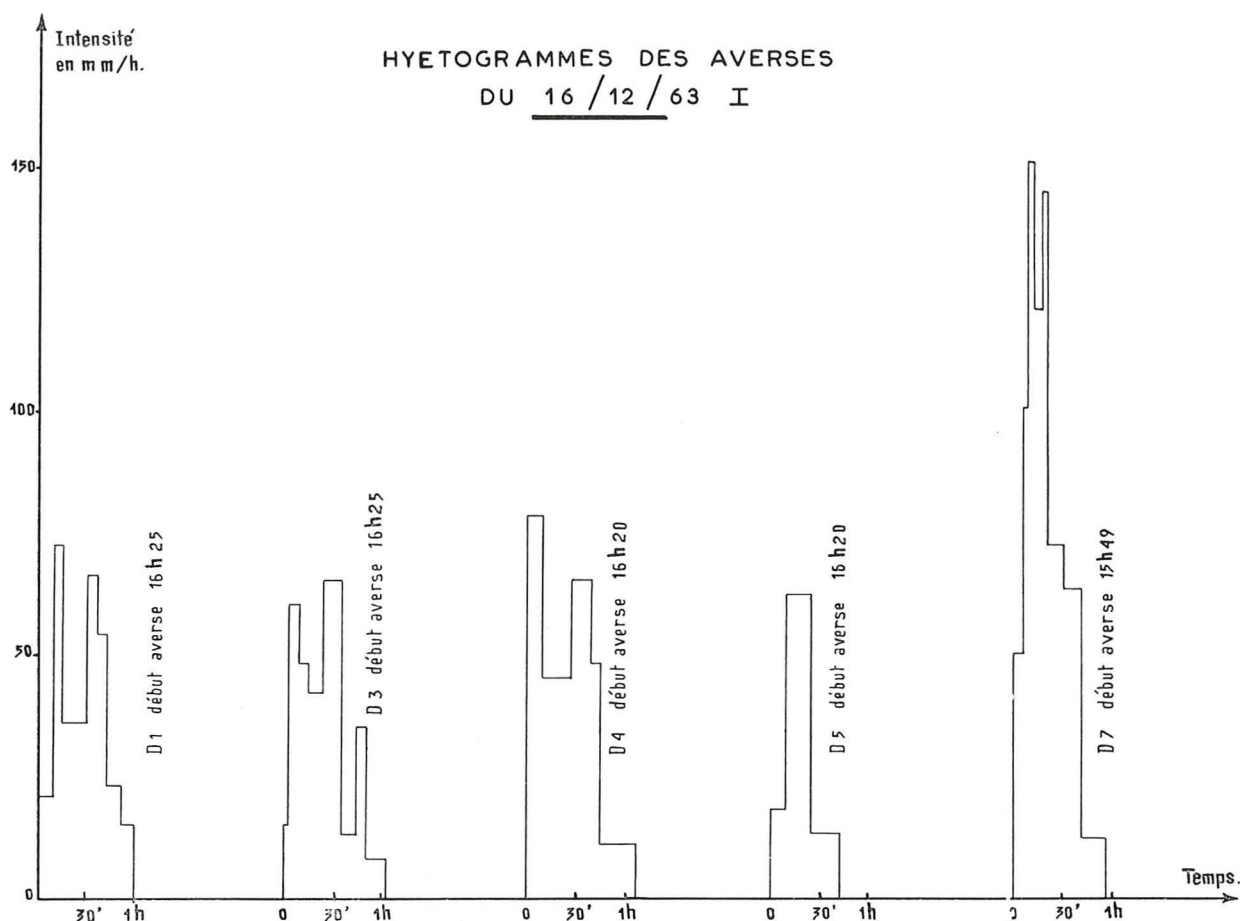


FIG. 42.

11.01.1969  
26.01.1971  
25.01.1972

Pour obtenir des représentations comparables, on a ramené toutes les crues à 100 % du débit maximal, après soustraction d'un débit de base égal au débit juste avant le commencement de la crue ; c'est-à-dire qu'on a porté en fonction du temps un

terme égal à  $\frac{Q - Q_{\text{base}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{base}}} \times 100$ , exprimé en %.

On n'a pas dans le cas présent, essayé de soustraire un débit « hypodermique » car l'appréciation de ce débit est assez aléatoire. Dans la figure 41 nous avons représenté le résultat de ces opérations en face des hydrogrammes correspondant dans le cas de la crue du 16.12.63 (1<sup>re</sup> crue).

Les conclusions immédiates, qu'on peut cependant tirer « de visu » de ces hydrogrammes sont les suivantes :

— Pour un même couvert, il y a un élargissement net et systématique des hydrogrammes en passant d'un bassin à un bassin de superficie plus grande. Seuls D1 et D2, dont les superficies sont trop proches, ne respectent pas absolument cette règle.

L'explication de ce phénomène est simple, il y a

allongement de la durée de ruissellement quand la superficie augmente. Ceci est dû en particulier, mais pas exclusivement, à l'accroissement du « temps de montée », que l'on tentera de chiffrer ultérieurement.

— Les hydrogrammes des bassins couverts de savoka sont plus aigus, à superficies comparables, que ceux des bassins couverts de forêt naturelle. Ceci est bien entendu à mettre en relation avec les ruissellements plus forts observés sous savoka.

La courbe de montée de ces bassins est plus ascendante que celle des bassins forestiers ; elle aurait même tendance à être concave vers le haut pendant une grande partie de la montée, alors que la courbe de montée des bassins forestiers s'infléchit plus rapidement.

— Les hydrogrammes d'un même bassin, pour des crues différentes, présentent des allures parfois comparables, mais rarement identiques.

— Les hydrogrammes de D5 sont fréquemment assez aplatis, surtout compte tenu de la superficie de D5 qui est assez faible (13,26 ha). Ceci est dû en particulier au fait que le débit de pointe est rarement fort à l'exutoire de D5.

Hormis ces observations d'ordre général sur la

TABLEAU N° 21. — *Tableau donnant le temps de montée des diverses crues en minutes*

Crue du	21.3.63	18.4.63	16.12.63 I	16.12.63 II	8.1.65	11.1.69	26.1.71	25.1.72
D1 .....	58	—	36	33	19	27	48	27
D2 .....	51	—	57	—	30	19	39	39
D3 .....	81	—	57	39	36	48	66	—
D4 .....	118	—	90	75	69	75	99	84
D5 .....	48	36	42	78	48	36	144	51
D6 .....	39	22	27	36	—	—	96	12

forme des hydrogrammes, on a essayé de tirer quelques lois plus précises sur les variations de différents paramètres, d'un bassin à un autre en partant du principe que, les crues représentées étant simples, les lois, si elles existent devraient apparaître nettement.

VARIATION DES TEMPS DE MONTÉE.

On a mesuré, sur les hydrogrammes représentés, le temps de montée. Pour éviter les imprécisions sur le début de la crue, on a pris le point de départ de l'hydrogramme sur le point d'ordonnée 2 % ; quand la « pointe » était aplatie on a pris comme maximum le milieu du palier ainsi constitué. Le temps de montée est finalement celui qui s'est écoulé entre les points d'ordonnée 2 % et 100 %. On obtient les résultats indiqués ci-dessus (tableau n° 21).

REMARQUES.

— On n'a pas mesuré les temps de montée des bassins d'Ampangalatsary pour la crue du 18.4.63 car cette montée est trop irrégulière.

— Pour D4, crue du 21.3.63, on a placé le début 12 mn après le début réel, pour tenir compte de la forme défectueuse de l'hydrogramme.

En fait si on pose que le temps de réponse est fonction du temps de concentration, lui-même fonction de la longueur du thalweg principal, on en déduit

que le temps de réponse doit être une fonction de la racine carrée de la surface, pour des bassins de forme non aberrante et à coefficient de GRAVELIUS comparables. La courbe aurait alors une allure parabolique, mais il semble curieux qu'elle soit si rapidement ascendante entre O et D1. On se contentera donc d'observer les variations du temps de montée entre D1 et D3 (fig. 43). Les écarts entre les temps de montée de D1 et D3 d'une part, D4 d'autre part, sont indiqués dans le tableau n° 22.

On admettra que la différence entre les temps de montée fluctue de façon aléatoire, et n'est pas liée au temps de montée propre de D4. La figure 44 où sont portés les temps de montée (tm) de D1 et D3 en fonction de ceux de D4 justifie cette hypothèse, dans laquelle les droites de régression sont parallèles à la première bissectrice (1).

(1) N. B. — En fait avec le peu de points dont on dispose, on obtient des droites de régression pas tout à fait parallèles à la 1<sup>re</sup> bissectrice (coefficient angulaire différent de 1), mais presque.

On a maintenu cette hypothèse qui est simplificatrice. Les équations de régression sont les suivantes :

$$tm(1) = 0,751 tm(4) - 30,3 \quad (r = 0,950 ; 7 \text{ points.})$$

Significatif à plus de 99 %)

$$tm(3) = 0,907 tm(4) - 25,1 \quad (r = 0,984 ; 6 \text{ points.})$$

Significatif à plus de 99 %).

TABLEAU N° 22. — *Différences entre les temps de montée de D1 ou D3 et D4 (en mm)*

Crue du	21.3.63	16.12.63 I	16.12.63 II	8.1.65	11.1.69	26.1.71	25.1.72	Moy.
D4-D1 ..	60	54	42	50	48	51	57	52
D4-D3 ..	37	33	36	33	27	33	—	33

TABLEAU N° 23. — *Différences des temps de montée D6 et D7 (en mm)*

Crue du	61.3.63	18.4.63	16.12.63	16.12.63	26.1.71	25.1.72	Moyenne
D7-D6 .....	48	48	21	12	9	54	30

Ramenée à l'hectare, cette augmentation du temps de montée est :

— entre D1 et D4 :

$$\frac{52 \text{ mn}}{101 - 9} = \frac{52 \text{ mn}}{91 \text{ ha}} = 0,56 \text{ mn/ha}$$

— entre D3 et D4 :

$$\frac{33 \text{ mn}}{101 - 39} = \frac{33 \text{ mn}}{62 \text{ ha}} = 0,53 \text{ mn/ha}$$

On en déduit, en simplifiant, qu'entre 10 et 100 ha, pour des bassins forestiers du type de ceux d'Ampangalatsary : le temps de montée augmente d'environ 0,55 mn soit 33 s par hectare.

Les mêmes opérations, tentées pour les bassins de Marolaona, ne donnent pas de résultats clairs. Bien sûr le temps de montée de D6 (7,27 ha) est toujours inférieur à celui de D7 (31,50 ha), mais la différence varie de façon semble-t-il assez aléatoire (Cf. fig. 45) (1). On peut toutefois à la rigueur fixer cette différence en moyenne à 30 mn (Cf. tableau n° 23, ci-contre).

Ramenée à l'hectare, cette augmentation du temps de montée devient :

$$\frac{30 \text{ mn}}{31,50 - 7,27} = \frac{30 \text{ mn}}{24,23 \text{ ha}} = 1,25 \text{ mn/ha}$$

Ce résultat, assez hasardeux, contredit ce qu'on peut penser *a priori*, il est en effet supérieur à celui trouvé pour Ampangalatsary, ce qui prouverait que l'eau s'écoule moins vite sur un bassin couvert de savoka que sous un bassin couvert de forêt naturelle

Sous couvert d'*Eucalyptus* n'ayant qu'un seul bassin, on ne peut étudier la variation du temps de montée avec la

(1) N. B. L'équation de régression entre les temps de montée de D6 et D7 est la suivante :

$$tm(6) = 0,975 tm(7) - 30,0 \quad (r = 0,733)$$

ce qui n'est significatif qu'à 90 %. Mais le coefficient angulaire de la droite est très proche de 1.

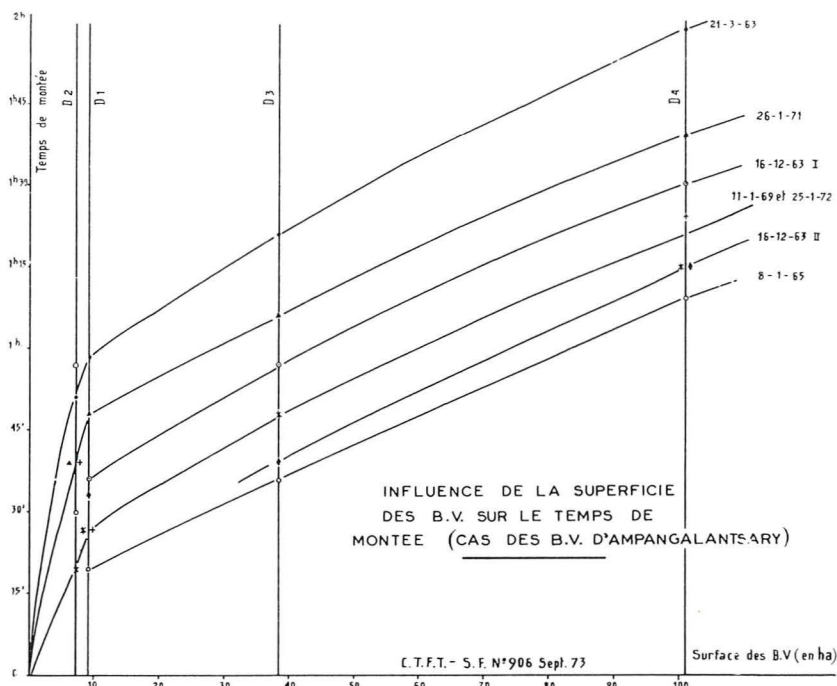


FIG. 43.

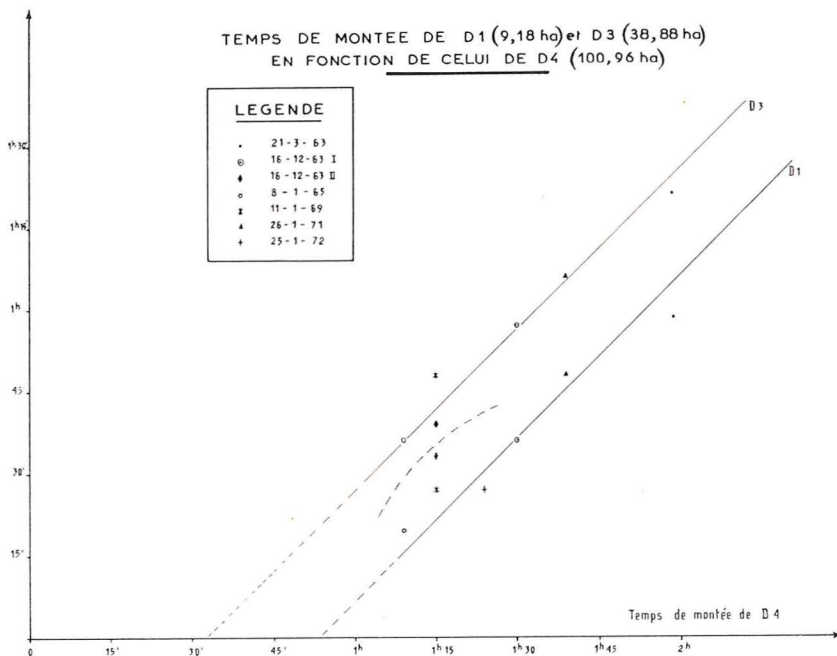
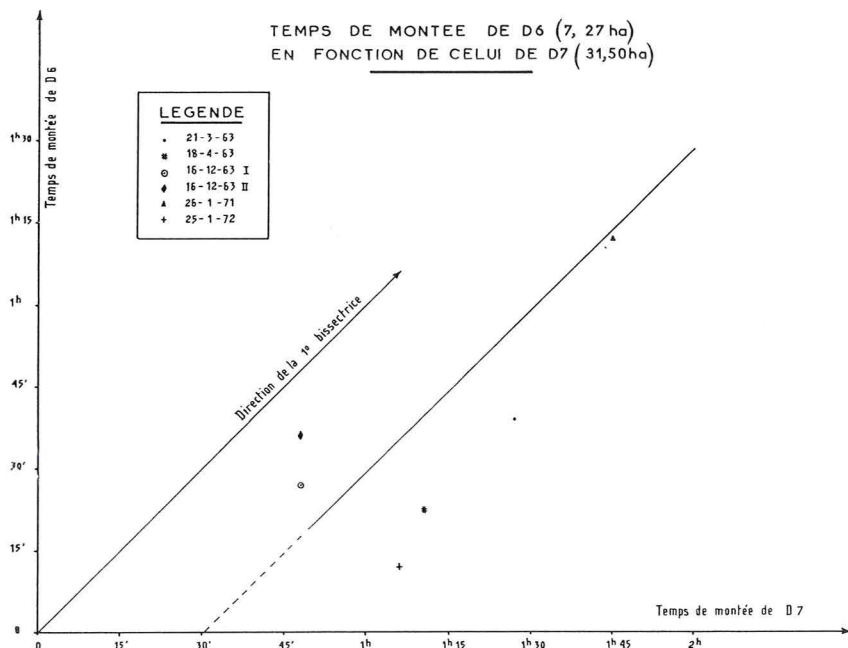


FIG. 44.

surface. On peut tenter de voir si le bassin versant 5 peut être rapproché d'un autre, mais on constate qu'il n'est comparable à aucun ; ses temps de montée évoluent de façon indépendante des autres.

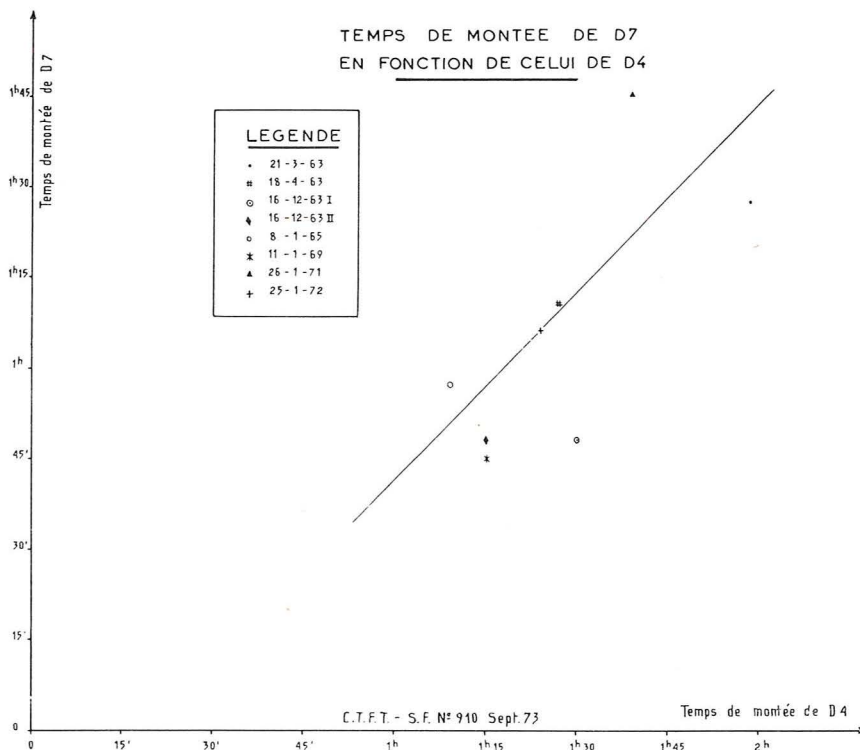
Il en est d'ailleurs de même des rapprochements qu'on peut tenter de faire entre les temps





de montée de bassins appartenant à des stations différentes ; il n'y a pas de liaison très serrée. La meilleure que l'on puisse trouver est celle entre D4 et D7, et elle n'est pas très bonne (Cf. fig. 46,  $tm(7) = 0,977 tm(4) - 20,0$ ;  $r = 0,728$

FIG. 46.



pour 7 points : seuil de signification compris entre 5 % et 10 %).

#### INFLUENCE DE LA SUPERFICIE SUR LES DÉBITS DE POINTE.

Toujours à partir de ces crues sélectionnées, nous allons tenter de voir si le débit de pointe (ramené à l'hectare) varie avec la surface des bassins versants, et de quelle façon.

Les débits de pointe des crues considérées sont donnés dans le tableau n° 24 :

On en tire les débits de pointe ramenés à l'hectare indiqués dans le tableau n° 25.

Ces débits de pointe ont été reportés en fonction de la surface sur les figures 47 (Ampangalatsary) et 48 (Marolaona).

Quelles conclusions peut-on en tirer ?

#### Cas d'Ampangalatsary.

Il apparaît assez nettement une diminution du débit de pointe par hectare quand la surface augmente. Ceci a déjà été évoqué mais cette évolution est peu régulière. Entre les débits de pointe de D1 et D2 il y a des fluctuations en général assez faibles, mais en sens contraire. Entre la moyenne du débit de D1 et D2, et les débits D3 et D4 il y a en général une décroissance, parfois linéaire, parfois hyperbolique (crue du 8.1.65), mais parfois des exceptions (crues du 16.12.63). Enfin la diminution du débit de pointe entre D3 et D4 serait d'autant plus grande que les débits seraient plus forts, mais il n'y a pas un rapport constant entre les débits de D4 et ceux de D3.

#### Cas de Marolaona.

On a moins de points encore que pour Ampangalatsary car deux limnigrammes de D6 sont défectueux. On observe cependant que dans le cas de 4 crues sur 6, il y a nettement diminution du débit de pointe

TABLEAU N° 24.  
Débits de pointe (en l/s)

Crue du	21.3.63	18.4.63	16.12.63 I	16.12.63 II	8.1.65	11.1.69	26.1.71	25.1.72
D1 ....	40	24	133	793	271	22	43	184
D2 ....	39	20	38	474	191	27	62	150
D3 ....	116	80	106	1.797	505	138	231	701
D4 ....	225	183	497	5.179	833	354	420	1.068
D5 ....	18	15	23	111	12	109	76	24
D6 ....	35	92	215	871	—	—	39	189
D7 ....	90	203	1.037	3.120	434	786	257	339

TABLEAU N° 25.  
Débits de pointe par hectare (en l/s × ha)

Crue du	21.3.63	18.4.63	16.12.63 I	16.12.63 II	8.1.65	11.1.69	26.1.71	25.1.72
D1 .....	4,4	2,6	14,5	86,5	20,6	2,4	4,6	20,0
D2 .....	5,4	2,4	5,3	66,5	26,8	3,7	8,7	21,0
D3 .....	3,0	2,1	2,7	46,3	13,0	3,6	6,0	18,0
D4 .....	2,2	1,8	4,9	51,3	8,3	3,5	4,2	10,6
D5 .....	1,5	1,1	1,7	8,4	0,9	8,2	0,6	1,8
D6 .....	4,5	12,7	29,6	120,0	—	—	5,4	26,0
D7 .....	2,9	6,5	32,9	99,0	13,8	25,0	8,5	10,8

Grands bassins de Périnet. Pluviomètre près de D4.



Grands bassins de Périnet. D5 après surélévation.



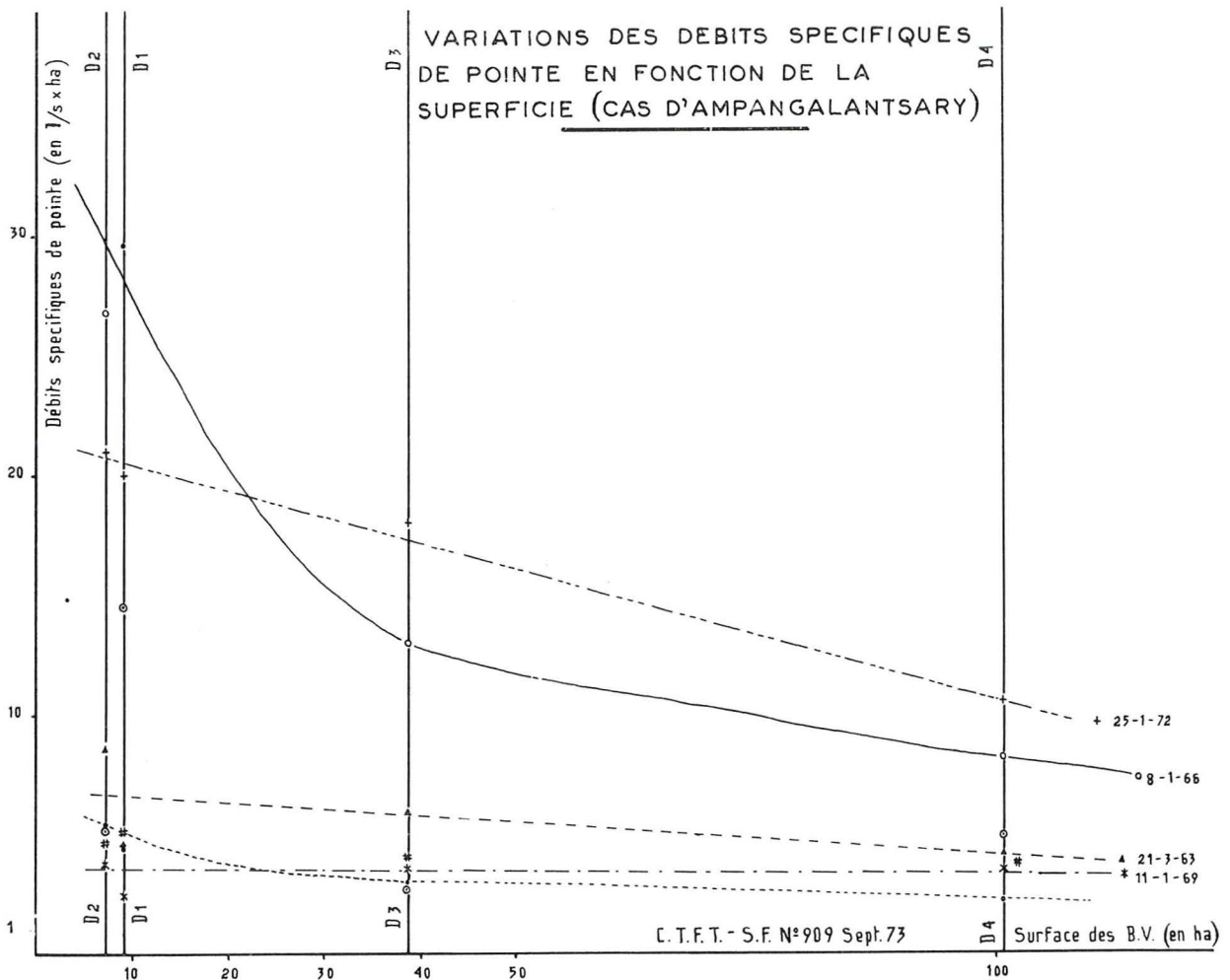
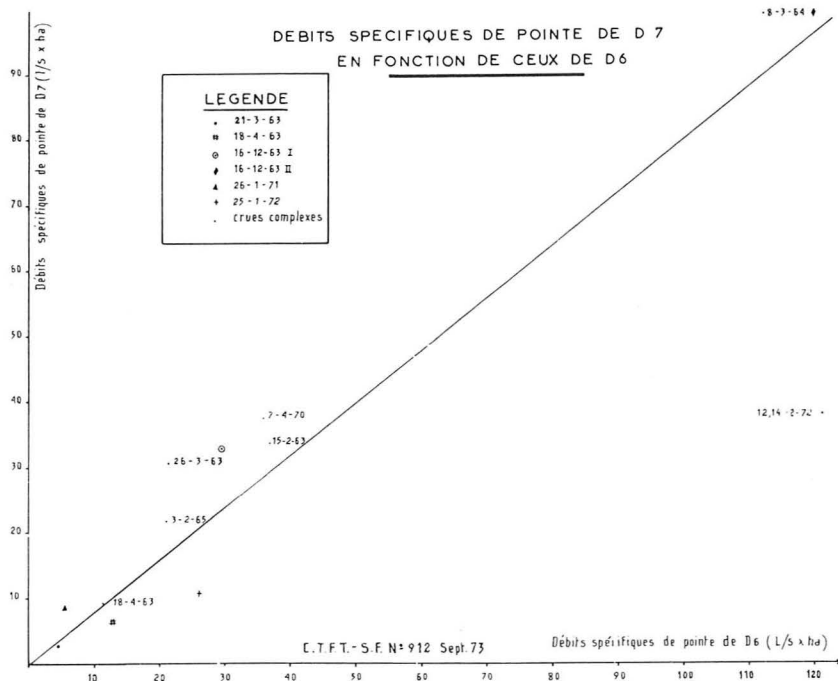


FIG. 47.



par hectare en passant de D6 (7,27 ha) à D7 (31,50 ha).

Si on porte le débit de D7 en fonction de celui de D6, on obtient la figure 49. Pour essayer d'obtenir plus de points, on a fait appel aux débits de pointe de crues complexes, mais ceux-ci fournissent des points très éparpillés. Pour se fixer tout de même les idées, on peut admettre que les débits de pointe de D7 sont en moyenne par hectare, 80 % de ceux de D6. La diminution serait donc environ de 3 % par hectare pour des bassins compris entre 7 et 30 ha, et sans doute un peu au-delà.

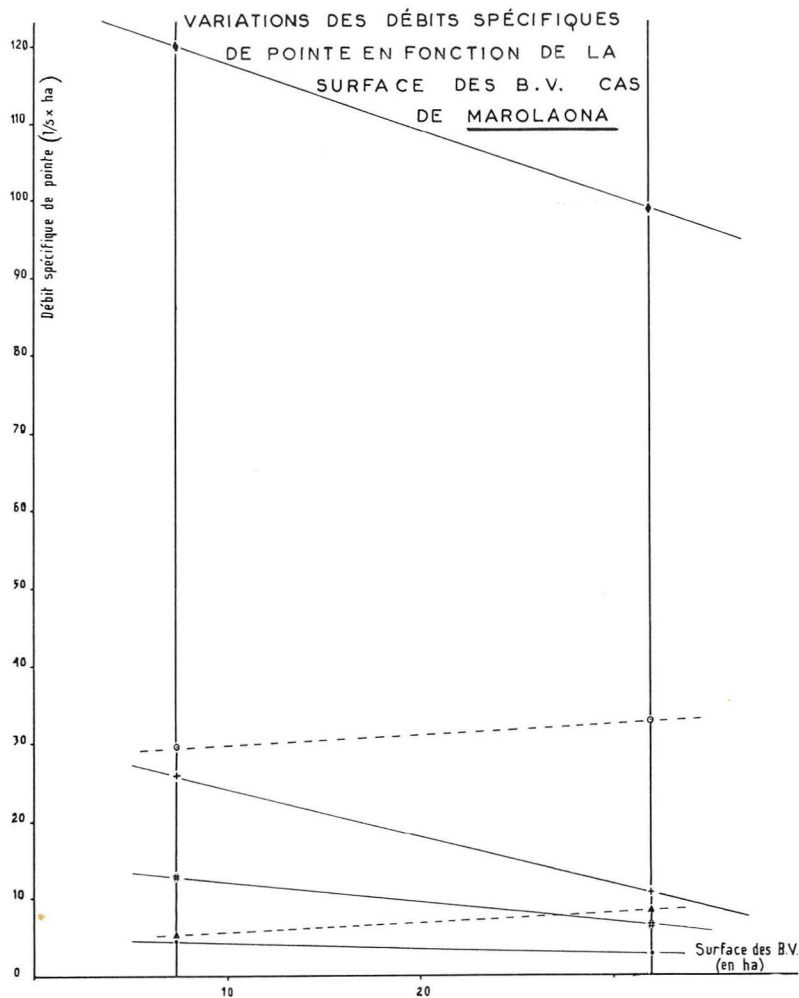
FIG. 49.

FIG. 48.

En résumé, la diminution des débits de pointe (par unité de surface) quand la superficie augmente semble un fait général, mais elle souffre d'exceptions et ne se fait pas très régulièrement. Elle est due en grande partie au laminage des crues, lié lui-même à l'augmentation de la durée des crues sur les grands bassins (en particulier à l'augmentation du temps de montée). L'effet d'échelle serait moins régulier sur les bassins embroussaillés que sur les bassins forestiers, mais parfois plus important (tant pour les variations du temps de montée que pour celles des débits de pointe). On observe donc une fois de plus l'effet régularisateur du couvert forestier.

**Comparaisons entre les bassins.**

ALLURE DES HYDROGRAMMES.  
RAPPORT ENTRE DÉBIT MAXIMUM ET LAME RUISSELÉE.



A partir des trois hydrogrammes-types de crues fortes pour chaque bassin (sauf pour D6 : un seul hydrogramme, celui du 25.1.72), on a tiré un hydrogramme-type moyen (par moyenne arithmétique). Ces hydrogrammes-types sont représentés sur les figures 50 (D1-D4 et D5) et 51 (D6 et D7).

Il n'y a pas de différence fondamentale dans la forme des hydrogrammes selon le couvert. On a déjà signalé que les hydrogrammes des bassins couverts de savoka étaient plus aigus (courbe de décrue plus concave, à dé-

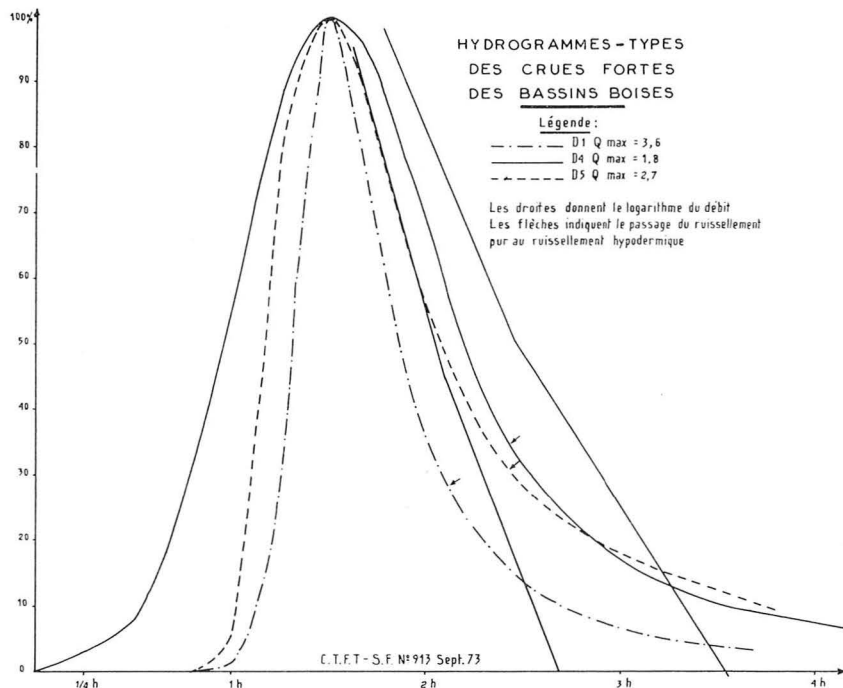
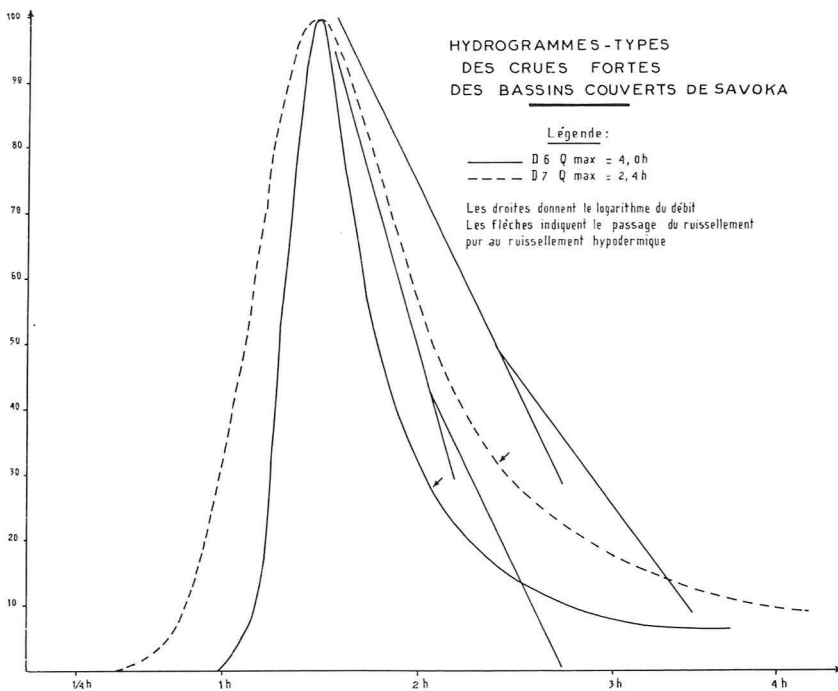


FIG. 50.



De haut en bas :

FIG. 51.

FIG. 52.

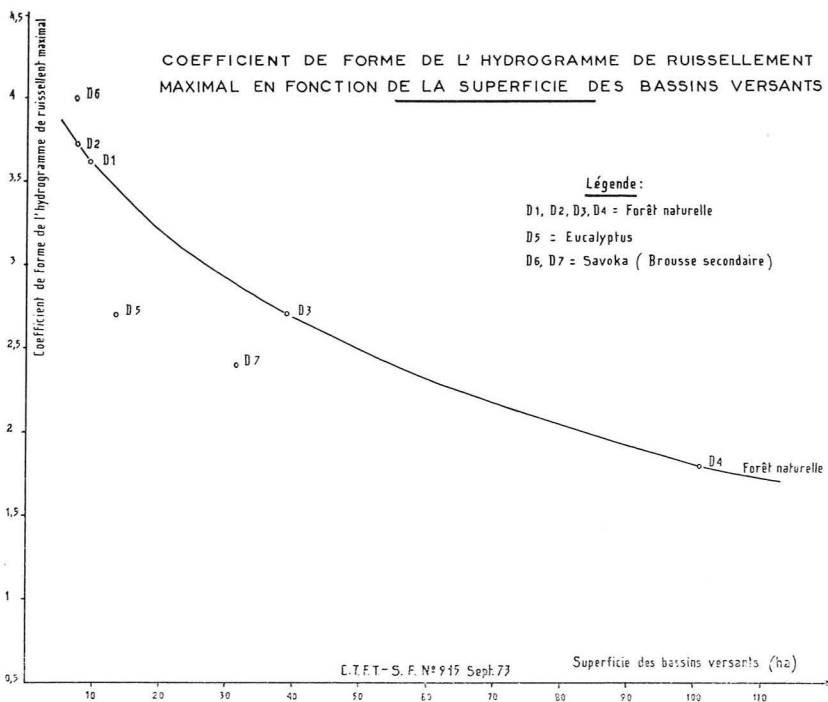
dermique commence de la même façon sur tous les bassins. (On détermine son début en reportant les logarithmes des ordonnées de l'hydrogramme ; on obtient deux droites dont l'intersection indique que l'on passe du ruissellement « pur » au ruissellement « hypodermique »).

Ceci semblerait prouver que le ruissellement hypodermique est peu affecté par le couvert, donc que la perméabilité des horizons inférieurs du sol change peu avec le couvert. Seules les couches tout à fait superficielles seraient différentes, et elles interviendraient peu dans l'écoulement hypodermique. Mais ceci reste hypothétique.

Est-il possible cependant de séparer l'influence de la superficie de celle du couvert ? On a reporté le rapport  $Q_{max}/h$  (coefficient de forme) en fonction de la superficie sur la figure 52.

On a ajouté les points correspondant à D2 et D3, d'après la crue du 8.1.65 qui est la plus aiguë enregistrée, et qui est déjà celle qui a fourni le rapport maximal pour D1 et D4. Les quatre points correspondants pour Ampangalatsary déterminent une courbe très satisfaisante, qui donne la variation du coefficient de forme maximum en fonction de la superficie pour un bassin couvert de forêt naturelle (fig. 52).

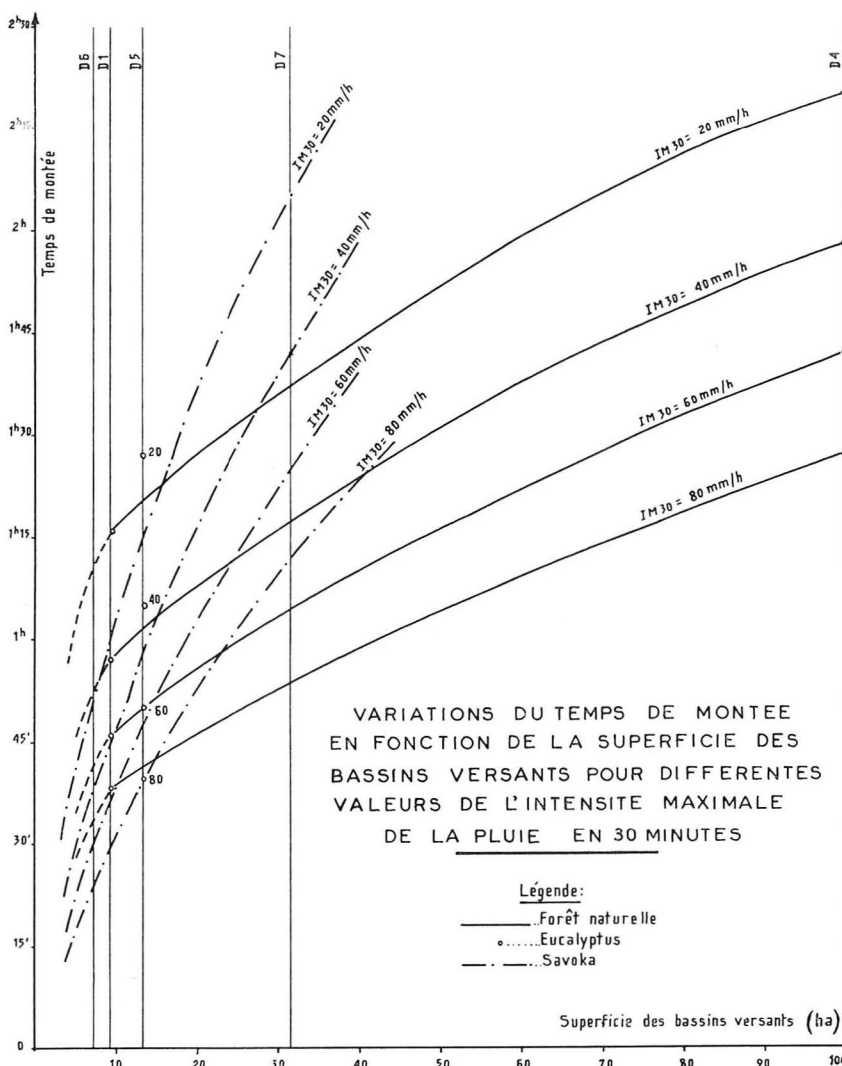
Les deux points correspondant à D6 et D7 détermineraient une courbe très plongeante qu'il ne semble pas licite de tracer, car il serait curieux qu'il y ait un tel laminage des crues sur bassins embroussaillés. Il est plus probable que d'autres facteurs (forme, relief) interviennent pour expliquer les coefficients de forme observés.



croissance plus rapide) mais ceci est assez peu marqué. Le bassin D5 (13,27 ha) couvert d'*Eucalyptus* a une courbe de dérive qui se superpose exactement à celle de D7 (31,50), couvert de savoka.

En conséquence de ceci, le ruissellement hypo-

Fig. 53.



Quant à D5 (*Eucalyptus*), il fournit un point qui se situe en dessous de la courbe des bassins de forêt naturelle. L'exemple précédent de D7 montre qu'il ne faut sans doute pas en tirer trop de conclusions.

Notons que ce coefficient de forme n'a qu'une influence secondaire sur la détermination du débit maximum, le facteur le plus important est le coefficient de ruissellement, qui détermine la hauteur ruisselée, et nous avons montré que les coefficients de ruissellement étaient plus forts sur bassins couverts de savoka que sous forêt.

VARIATIONS DU TEMPS DE MONTÉE.

A partir des courbes moyennes donnant le temps de montée d'un bassin en fonction de l'intensité maximale de pluie en 30 mn (IM 30) on établit le tableau suivant, pour les valeurs 20-40-60 et 80 mm/h de IM 30.

TABLEAU N° 26.  
 Temps de montée (en h et mn)

IM 30 (mm/h)	Bassins versants				
	D1	D4	D5	D6	D7
20	1,16	2,20	1,27	0,49	2,05
40	0,57	1,58	1,05	0,38	1,42
60	0,46	1,42	0,50	0,31	1,25
80	0,38	1,27	0,40	0,25	1,12

— Bassins d'Ampangalsary.

On a montré (Cf. fig. 43) que les variations du temps de montée en fonction de la surface étaient régulières, et presque linéaires entre D1-D3 et D4. La connaissance des temps de montée de D1 et D4 seulement, pour différentes IM 30, peut donc nous

permettre de tracer les courbes des temps de montée moyens d'un bassin couvert de forêt naturelle en fonction de la surface et pour diverses IM 30 (Cf. fig. 53). Il ne faut pas perdre de vue que les courbes donnent des moyennes, et que d'assez larges variations sont possibles autour de ces moyennes.

Les courbes ainsi tracées sont rigoureusement parallèles à celles de la figure 43 : ce qui confirme la méthode employée pour les tracer. On se heurte à nouveau au problème de savoir comment évoluent les courbes pour des superficies inférieures à 10 ha. On a ébauché une allure possible (en tiretés). Entre 10 et 100 ha, l'augmentation moyenne du temps de montée donnée par la pente des courbes, est de 0,6 mn/ha (36"/ha), chiffre proche de celui trouvé précédemment.

— Bassin de Betsakotsako.

On peut seulement faire remarquer que les temps de montée du bassin D5 semblent être du même

ordre de grandeur que ceux qu'aurait un bassin de superficie égale mais couvert de forêt naturelle.

— *Bassin de Marolaona.*

Les points de D6 et D7 permettent de tracer le faisceau de courbes en traits mixtes sur la figure 53. Ce faisceau converge vers l'origine ce qui est satisfaisant, mais il est par ailleurs difficile à interpréter par rapport aux courbes d'Ampangalatsary. Pourquoi le temps de montée augmente-t-il tant sur des bassins embroussaillés, et jusqu'où irait cette évolution ? Un troisième bassin versant sous savoka aurait permis de se faire une idée sur ces questions, et en particulier de savoir si l'un ou l'autre des bassins D6 et D7 n'a pas un comportement très particulier.

En l'absence d'autre élément d'appréciation, nous éviterons d'émettre des hypothèses explicatives sur l'allure de cette variation du temps de montée. Cependant l'augmentation moyenne de ce temps de montée serait de 2,35 mn/ha, soit 2'21" (ceci est presque le double de ce qu'on avait trouvé auparavant par une autre méthode, mais la dernière estimation est sans doute meilleure).

VARIATIONS DU TEMPS DE RÉPONSE.

On établit un tableau analogue au précédent à partir des courbes donnant le temps de réponse moyen en fonction de IM 30.

TABLEAU N° 27.

*Temps de réponse (en h et mn)*

IM 30 (mn/h)	Bassins versants				
	D1	D4	D5	D6	D7
20	1,16	—	1,17	0,54	1,48
40	0,50	1,50	0,58	0,39	1,32
60	0,32	1,22	0,44	0,22	1,21
80	0,18	1,05	0,33	0,07	1,13

— *Bassin d'Ampangalatsary.*

On suppose que le temps de réponse suit la même loi d'évolution que le temps de montée pour tracer les courbes entre les points de D1 et ceux de D4. On trace ainsi les courbes de la figure 54. La différence principale avec celles donnant le temps de montée est que le faisceau de courbes obtenu semble converger vers les superficies supérieures. Ceci prouverait que pour un très grand bassin le temps de réponse ne dépend pas de l'intensité de la pluie, ou beaucoup moins que pour un petit bassin. En moyenne l'augmentation du temps de réponse est plus lente que celle du temps de montée ; elle serait de 27 secondes par hectare.

— *Bassin de Betsakotsako.*

Les temps de réponse seraient un peu plus longs

que ceux d'un bassin équivalent couvert de forêt primaire, sauf pour les intensités de pluie faible.

— *Bassin de Marolaona.*

L'allure des courbes est la même que celle des temps de montée, mais le faisceau, comme pour Ampangalatsary, serait convergent vers des grandes valeurs de la superficie. Pas plus que pour les temps de montée nous ne nous risquerons à décider si l'allure de ces courbes est aberrante ou pas. Augmentation moyenne du temps de réponse : 2'24"/ha.

CONCLUSIONS.

Depuis 1963/64 nous avons suivi les sept bassins hydrologiques de superficie et de couvert différents sur la station de Périnet. Dans le développement qui précède et dans un rapport qui détaille l'exploitation des données ainsi recueillies (J. M. NINGRE, Etude hydrologique comparative de sept bassins versants de superficie et de couvert différents dans la zone forestière Orientale de Madagascar — 1973) nous nous sommes efforcés de distinguer le rôle respectif joué par la pluviométrie, la superficie des bassins étudiés et leur couvert naturel. Cette étude, rappelons-le, avait essentiellement pour but de définir ou d'essayer d'approcher au mieux l'effet de la couverture naturelle (forêt naturelle-reboisement-savoka) sur l'économie de l'eau.

Compte-tenu des développements précédents il est possible de résumer ci-après les principales conclusions qui peuvent être tirées de l'exploitation des résultats de ces 10 années d'observations.

**Effets de la pluviométrie.**

En premier lieu on a observé que la pluviométrie pouvait varier de façon très importante entre deux endroits peu éloignés. A trois kilomètres de distance, la pluviométrie annuelle moyenne (mesurée sur dix ans) varie de 1.615 mm à 2.114 mm. Cette différence est statistiquement très significative.

Elle est répartie entre tous les mois de l'année et joue non sur le nombre des pluies enregistrées mais sur la hauteur de chaque pluie. Il est vraisemblable qu'elle est due essentiellement à des conditions de relief, ceci est un point important.

EFFETS SUR LE COEFFICIENT D'ÉCOULEMENT ANNUEL.

Le coefficient d'écoulement annuel (rapport entre la quantité d'eau écoulée et la quantité d'eau précipitée pendant une année), augmente quand la pluviométrie annuelle augmente. Pour tous les bassins, en moyenne, l'augmentation est de 3 % environ pour 100 mm de pluie supplémentaire. Au-delà d'une certaine pluviométrie comprise entre 2.000 et 2.300 mm, cette augmentation ralentit et le coefficient d'écoulement atteindrait une valeur limite, elle-même variable avec la superficie du

bassin versant. Pour des bassins d'environ 13 ha, on a les valeurs limites du coefficient d'écoulement annuel suivantes :

- Forêt naturelle : 36 %.
- *Eucalyptus* : 20 %.
- Savoka : 56 %.

Ce coefficient d'écoulement augmente également avec la superficie des bassins versants. Cette augmentation est surtout nette pour le couvert forestier. Il est permis de penser qu'au-delà de 100 ha, la valeur limite est atteinte, et on aurait :

- Forêt naturelle : 43 %.
- Savoka : 58 %.

**EFFETS SUR LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT.**

Le coefficient de ruissellement (rapport de la lame d'eau ruisselée lors d'une pluie à la hauteur de cette pluie) varie de façon assez large. Néanmoins on peut, pour une hauteur de pluie donnée, trouver un coefficient de ruissellement maximum (Cf. p. 46). Ce coefficient de ruissellement maximum augmente d'environ 0,14 % par mm de pluie supplémentaire pour les bassins boisés et d'environ 0,30 à 0,40 % pour les bassins couverts de savoka.

**EFFETS DE L'INTENSITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LES TEMPS DE MONTÉE ET DE RÉPONSE.**

Pour les bassins de superficie relativement petite que nous avons étudiés, les temps de montée et de réponse varient en moyenne, mais avec d'assez larges fluctuations, en fonction de l'intensité maximale en 30 mn (IM 30) de la pluie (Cf. p. 50, 51, 52, 53 et 54). Grossièrement, et à titre d'exemple, on peut dire que les temps de montée ou de réponse augmentent de 10 à 15 mn quand on passe d'une IM 30 de 80 à 60 mm/h, de 15 mn quand on passe d'une IM 30 de 60 à 40 mm/h, de 20 mn quand on passe d'une IM 30 de 40 à 20 mm/h.

**Effets de la superficie des bassins versants.**

Il s'agit là de l'effet d'échelle, il pourra être étudié surtout dans le cas où nous avons des bassins de surface différente sous le même couvert.

**EFFETS SUR LE COEFFICIENT D'ÉCOULEMENT ANNUEL.**

Ces variations ont déjà été évoquées précédemment. Elles prouvent que, dans les conditions

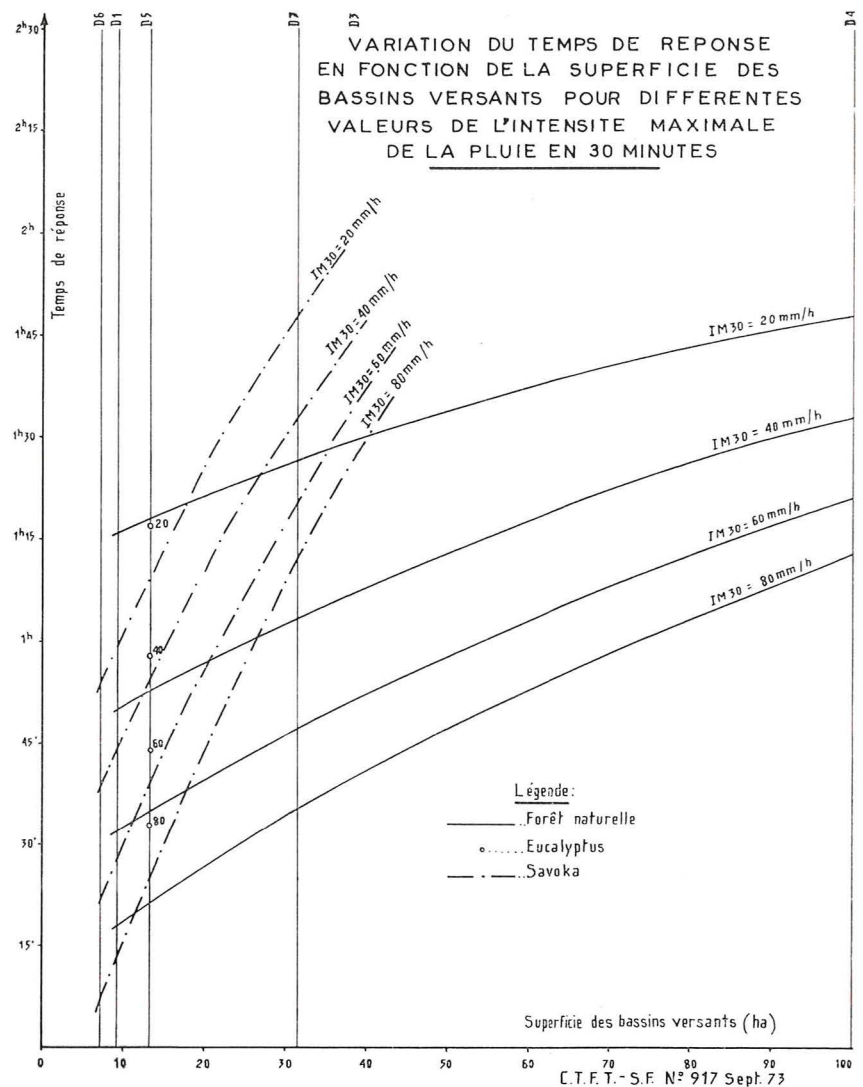


FIG. 54.

existant à Périnet-Analamazaotra, les petits bassins versants perdent une part assez importante de l'eau qu'ils reçoivent. Ces pertes se font essentiellement par infiltration.

**EFFETS SUR LES TEMPS DE MONTÉE ET DE RÉPONSE.**

Il est évident que plus un bassin est grand plus il réagira lentement aux précipitations qu'il reçoit. On a cependant pu préciser un peu cette évolution dans le cas des bassins couverts de forêt naturelle ; l'augmentation est régulière, et est de l'ordre de 30 à 40 s/ha supplémentaire pour le temps de montée et de moins de 30 s/ha pour le temps de réponse, dans les conditions de relief observées, et entre 10 et 100 ha.

Entre les deux bassins couverts de savoka que l'on a étudiés, on observe une augmentation beaucoup plus rapide, de l'ordre de 2'20" par hectare



aussi bien pour le temps de montée que le temps de réponse.

Il semble malheureusement difficile de savoir si on a là une loi générale, valable pour tous les bassins de couvert analogue ou si on a affaire à un cas particulier et à une variation due à des facteurs propres à l'un ou l'autre bassin (forme, relief, etc...). En l'absence d'autres éléments de réponse, il vaut sans doute mieux s'en tenir à cette deuxième hypothèse.

#### COEFFICIENT DE FORME DES HYDROGRAMMES TYPES.

On appelle coefficient de forme le rapport du débit spécifique maximal (en l/s × ha) à la hauteur d'eau ruisselée (en mm). Ce coefficient de forme évolue en sens inverse du temps de montée. Donc pour les hydrogrammes des bassins forestiers, on a une décroissance régulière, d'allure hyperbolique, qui fait passer le coefficient de forme de 3,1 pour 10 ha à 1,8 pour 100 ha.

Pour les deux bassins couverts de savoka, on observe une décroissance forte du coefficient de forme qui passe de 4 pour D6 à 2,4 pour D7, mais pas plus que pour la variation des temps de montée à laquelle elle est liée, il n'est possible de savoir si cette variation exprime une loi générale ou un cas particulier.

L'effet d'échelle semble par contre ne pas avoir d'influence très nette sur les coefficients de ruissellement.

#### Effets du couvert.

L'effet du couvert naturel apparaît très important et un certain nombre de points ont pu être dégagés :

##### EFFETS SUR LE DÉFICIT D'ÉCOULEMENT.

On observe que la quantité d'eau non restituée à l'exutoire n'est pas la même pour tous les bassins. Après avoir éliminé l'influence de la pluviométrie et celle de la superficie, on a estimé que par rapport à l'écoulement d'un bassin de savoka, celui d'un bassin de superficie égale était inférieur :

- de 100 mm dans le cas d'une forêt naturelle,
- de 250 mm dans le cas d'un peuplement d'*Eucalyptus* âgés.

Si les pertes par drainage profond sont les mêmes pour ces trois bassins, on en conclut :

- que la forêt naturelle évapotranspire 100 mm de plus par an que la savoka ;
- que le peuplement d'*Eucalyptus* évapotranspire 250 mm de plus par an que la savoka.

Ces renseignements confirment ceux des expérimentations réalisées en Afrique du Sud (Cathedral Peak) : les forêts autochtones évapotranspirent moins que les forêts d'*Eucalyptus* artificiellement créées. D'autre part la consommation d'eau par la forêt naturelle est plus élevée que celle de la brousse de régénération.

#### EFFETS SUR LE COEFFICIENT DE RUISSÈLEMENT.

Les bassins couverts de savoka ont des coefficients de ruissellement nettement supérieurs à ceux des bassins boisés. Le coefficient de ruissellement maximum est assez difficile à estimer, nous proposons cependant après calcul par des voies différentes les valeurs suivantes (où p = précipitation en mm ; Krx = coefficient de ruissellement maximum en %) :

— Bassins boisés :

$$\begin{aligned} p < 200 \text{ mm} &: K_{rx} = 0,175 p, \\ p > 200 \text{ mm} &: K_{rx} = 35 \%. \end{aligned}$$

— Bassins couverts de savoka :

$$\begin{aligned} p < 130 \text{ mm} &: K_{rx} = 0,50 p, \\ p > 130 \text{ mm} &: K_{rx} = 65 \%. \end{aligned}$$

#### EFFETS SUR LE DÉBIT SPÉCIFIQUE MAXIMUM DES CRUES.

Ce débit spécifique est la résultante de nombreux facteurs, mais principalement du coefficient de ruissellement et du coefficient de forme de l'hydrogramme des crues fortes d'un bassin versant.

Une première évaluation, par étude des 10 crues maximums de chaque campagne nous a conduits à estimer que la crue décennale avait pour débit spécifique, pour un bassin de superficie assez grande (comprise entre 30 et 100 ha) :

- 90 l/s × ha pour les bassins boisés,
- 150 l/s × ha pour les bassins couverts de savoka.

Une autre estimation serait possible à partir de la connaissance de la pluie décennale. Le risque est, si on lui applique le coefficient de ruissellement maximum et le coefficient de forme maximum, d'aboutir à une estimation très exagérée.

Nous n'avons pas déterminé la pluie décennale à Périnet. Remarquons de toute façon que celle-ci ne serait valable que localement, puisque la pluviométrie varie de façon importante. Par ailleurs les données météorologiques ne donnent pas une idée de l'intensité de la pluie, ni de la forme.

Dans la publication n° 26 du Service Météorologique de Madagascar (février 1958) intitulée « Les pluies à Madagascar et aux Comores », on indique que la pluie maximale en 24 h relevée à Analama-zaoatra a été de 259,2 mm le 2 mars 1937. Mais il n'y a d'indication ni sur la durée des observations (postérieures à 1931 de toute façon), ni sur l'allure de cette pluie (averse tropicale ou pluie cyclonique).

Si on fait le calcul pour une pluie de 150 mm, on trouve :

$$\begin{aligned} &\text{— pour D4 :} \\ \text{hauteur ruisselée} &: 150 \times 35 \% = 52,5 \text{ mm,} \\ \text{débit spécifique} &: 52,5 \times 1,8 = 94,5 \text{ l/s} \times \text{ha.} \\ &\text{— pour D7 :} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{hauteur ruisselée} &: 150 \times 65 \% = 97,5 \text{ mm} \\ \text{débit spécifique} &: 97,5 \times 2,4 = 234 \text{ l/s} \times \text{ha.} \end{aligned}$$

Le résultat de D4 est du même ordre que celui donné plus haut, celui de D7 lui est très supérieur.

Si l'on fait le calcul pour deux bassins d'une même surface égale à celle de D7, le coefficient de forme du bassin boisé devient 2,9 et le débit spécifique décennal  $156 \text{ l/s} \times \text{ha}$ .

Les rapports entre les débits spécifiques estimés par nos deux méthodes sont :

— première méthode :  $\frac{150}{90} = 1,67$

— deuxième méthode :  $\frac{234}{156} = 1,50$

**C'est ce que nous retiendrons comme résultat : les débits spécifiques des crues exceptionnelles sont une fois et demie à deux fois plus forts sur les bassins dont le couvert, dégradé, est une savoka, que sur les bassins qui ont une couverture boisée.**

\* \* \*

Ainsi la couverture forestière joue-t-elle un rôle ;

— sur le déficit d'écoulement, la forêt et tout spécialement le reboisement en *Eucalyptus* évapotranspire plus que la savoka ;

— pour des débits de crues à peu près identiques les reboisements d'*Eucalyptus* ne laissent s'écouler qu'un débit permanent (débit utilisable) trois fois moindre que la forêt naturelle ;

— sur le coefficient de ruissellement, la végétation forestière diminue dans une notable proportion le coefficient de ruissellement maximum ;

— sur le débit spécifique des crues, la couverture forestière régularise d'une manière très nette (rapport 1,5 à 2) l'écoulement des eaux ;

C'est en définitive là le résultat le plus important sur le plan pratique. Il avait été depuis longtemps indiqué que le manteau forestier de la Falaise Orientale de Madagascar jouait un rôle modérateur sur l'écoulement des eaux. Ce qui était jusqu'à présent avancé, sans que l'on

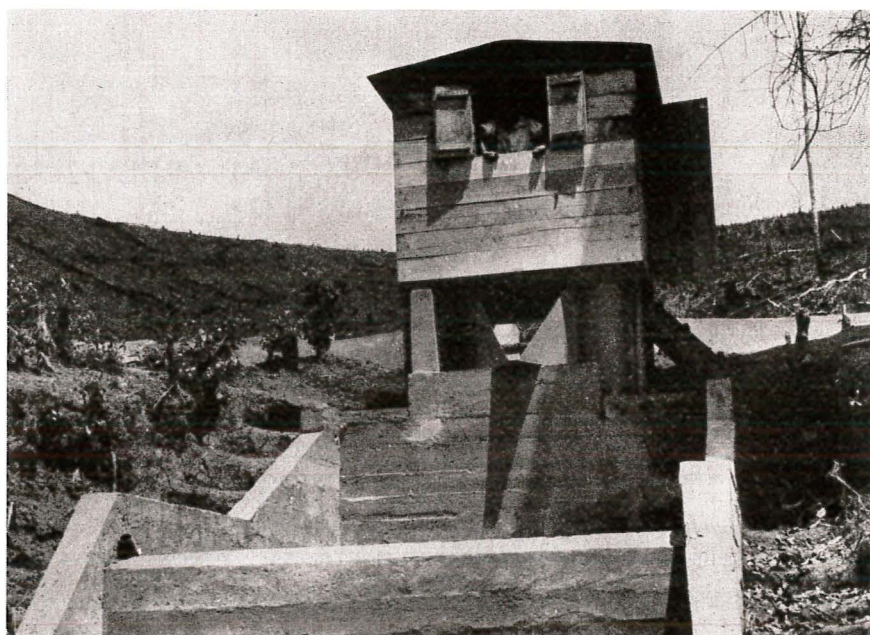
*Bassins versants élémentaires  
de Périnet-Marolaona.*

De haut en bas :

— Déversoir de type H sous vieille savoka : B. V. 71.

— Déversoir du B. V. 73 « tavy ».

— Détail du B. V. 73 après brûlis.



puisse asseoir cette affirmation sur des bases chiffrées résultant d'une expérimentation, a été établi et l'ordre de grandeur de cet effet précisé.

Ainsi le déboisement d'un bassin versant entraînera dans les propositions que nous venons d'établir un accroissement des débits spécifiques des crues exceptionnelles, sans tenir compte de tous les autres effets qui résultent de cette déforestation et de cette augmentation des débits : dégâts propres des crues, érosion, lessivage des terres, etc...

C'est à l'aménagiste, au responsable forestier, à l'agronome, à l'ingénieur des Travaux Publics ou l'hydroélectricien qu'il appartient, selon le cas, de prendre les faits en considération.

Ces indications que nous pouvons apporter sur l'effet de la couverture forestière dans la zone de la Falaise Orientale de Madagascar devraient permettre d'approcher un peu mieux les phénomènes écologiques complexes dont cette forêt est le siège.

En effet la pratique du tavy (culture sur brûlis) qui est pour une large part la cause du déboisement, a des origines multiples et fait intervenir des phénomènes socio-économiques de divers ordres. Les résultats à long terme de cette pratique risquent d'entraîner un déséquilibre néfaste à l'environnement humain de tout l'Est de Madagascar. L'effet d'un déboisement accru de la zone forestière orientale fait en plus intervenir des phénomènes d'un autre ordre (superficies très supérieures) et d'autres problèmes (protection de la faune et de la flore). Les indications tirées de l'expérimentation entreprise par le C. T. F. T. depuis 10 ans à Madagascar sur l'influence de la forêt ne constituent qu'un des éléments, particulièrement important cependant, mis à la disposition des responsables chargés de définir la politique générale d'aménagement dans l'intérêt général de l'homme et la sauvegarde de son environnement.

## INFLUENCE DES MISES EN CULTURE EN ZONE FORESTIÈRE — PÉRINET

### Expériences sur les bassins versants 71-72-73

#### SUR LE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL.

##### Influence du couvert sur le bilan de l'eau.

Le tableau n° 28, ci-dessous, montre que, pour toutes les campagnes le total annuel ruisselé est le plus fort sur le bassin 73 soumis au tavy. Les courbes cumulées (fig. n° 55) font bien apparaître les différences entre les trois bassins et, principalement,

entre les deux méthodes culturales tavy et cultures aménagées. La mise en jachère du bassin 73 après deux ans de cultures de riz, ne semble pas avoir d'effet immédiat sur le ruissellement qui reste toujours le plus important sur ce bassin. En moyenne, le ruissellement observé sur le bassin aménagé B. V. 72 représente 60 % de celui du bassin versant 73 et celui du bassin témoin B. V. 71 à peine 40 % de ce dernier.

TABLEAU N° 28. — RUISSELLEMENTS ANNUELS SUR BASSINS VERSANTS ÉLÉMENTAIRES  
DE PÉRINET-MAROLAONA

Campagne	Pluviom. mm	B. V. 71		B. V. 72		B. V. 73 Ruis. mm
		Ruis. mm	% B. V. 73	Ruis. mm	% B. V. 73	
1963/64	1.780	198,1	57 %	266,4	77 %	346,5
1964/65	1.975	35,1	23 %	79,8	53 %	150,4
1965/66	1.556	0	0 %	1,3	36 %	3,5
1966/67	1.510	0 2	3 %	3,1	40 %	7,7
1967/68	1.906	18,6	17 %	50,4	47 %	107,2
1968/69	1.781	1,1	2 %	29,0	46 %	63,1
1969/70	2.277	23,1	25 %	50,6	55 %	91,6
1970/71	2.057	92 (*)	45 %	136,2	67 %	204,7
1971/72	2.141	141,0	44 %	187,0	59 %	318,4
Moyenne	1.887	55,5	39 %	89,3	62 %	143,7

(\*) Enregistrements défectueux, valeur estimée par corrélation avec B. V. 72.

**Influence du couvert sur le ruissellement instantané.**

**CLASSEMENT EN FONCTION DU COEFFICIENT DE RUISSÈLEMENT.**

Nous n'avons considéré comme « ruissellement » que ceux dont l'écoulement est supérieur à 1 % de la pluie correspondante. Dans la figure n° 56 nous avons classé les crues suivant les coefficients de ruissellement en % et nous avons repris dans le tableau ci-après quelques valeurs caractéristiques :

TABLEAU N° 29

N° B. V.	Nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 %	20 %	10 %	5 %	1 %
71 Témoin	1	3	9	14	17
72 Cultures	1	11	24	35	48
73 « Tavy »	3	25	39	53	64

On observe surtout que pour un coefficient donné, le bassin soumis au tavy présente un nombre de ruissellements toujours très supérieur aux deux autres. Ceci est d'autant plus marqué pour les forts coefficients puisque le nombre de ruissellements supérieurs à 20 % qui est de 25 sur le bassin versant 73 n'atteint même pas la moitié de ce nombre sur le bassin versant des Cultures et le 1/8<sup>e</sup> sur le bassin versant Témoin.

**CLASSEMENT EN FONCTION DE LA LAME D'EAU RUISSÉE (en mm).**

Ce classement est représenté dans le graphique n° 57. Sur les 64 crues enregistrées au bassin versant 73 (coef. > 1 %) nous voyons déjà qu'on en a observé à peine les 3/4 sur le bassin versant 72 et le 1/4 sur le bassin versant 71. Le tableau ci-après reprend pour quelques valeurs caractéristiques le pourcentage du nombre de crues d'un certain volume observé, par rapport au nombre total

enregistré sur le bassin versant 73 (64 crues en 9 ans) :

TABLEAU N° 30

N° B. V.	% du nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 mm	20 mm	10 mm	5 mm	1 mm
71 Témoin	3 %	9 %	14 %	20 %	27 %
72 Cultures	8 %	19 %	23 %	39 %	75 %
73 « Tavy »	14 %	20 %	33 %	56 %	100 %

**VALEURS MAXIMALES DES COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT.**

Les maximums annuels atteints par le coefficient de ruissellement sur les trois bassins ont été indiqués dans le tableau n° 31 :

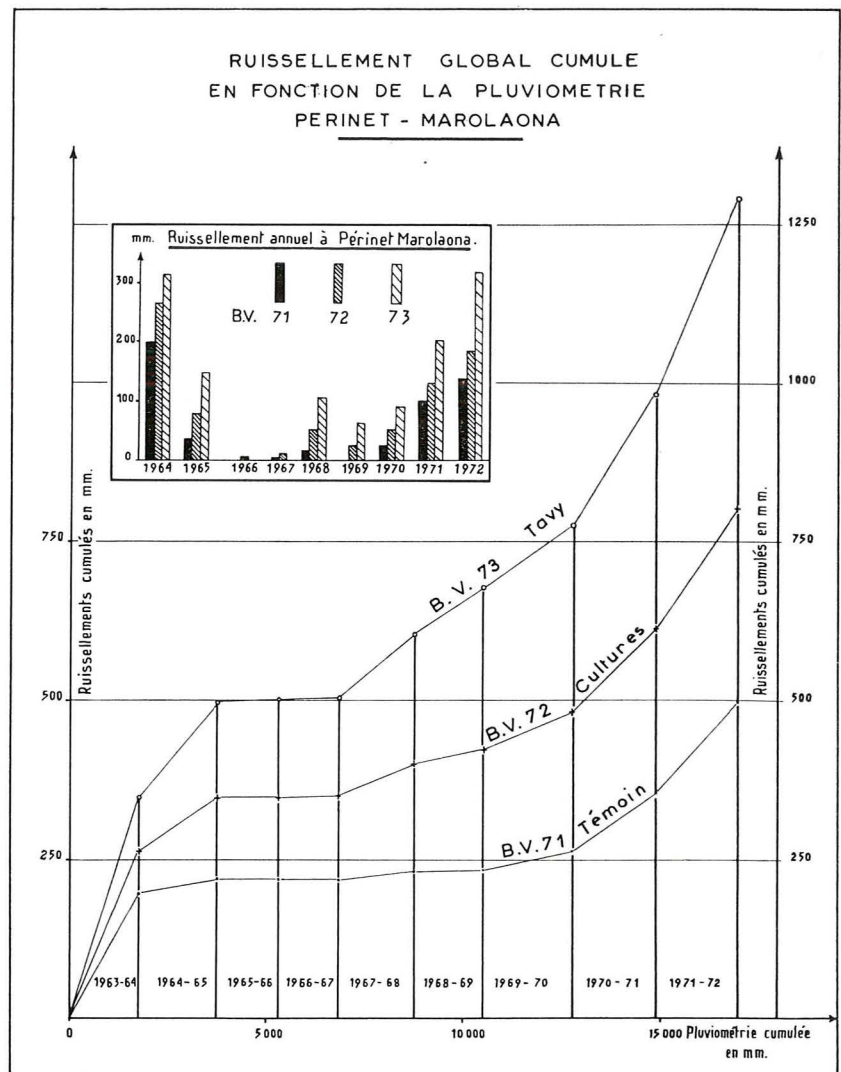
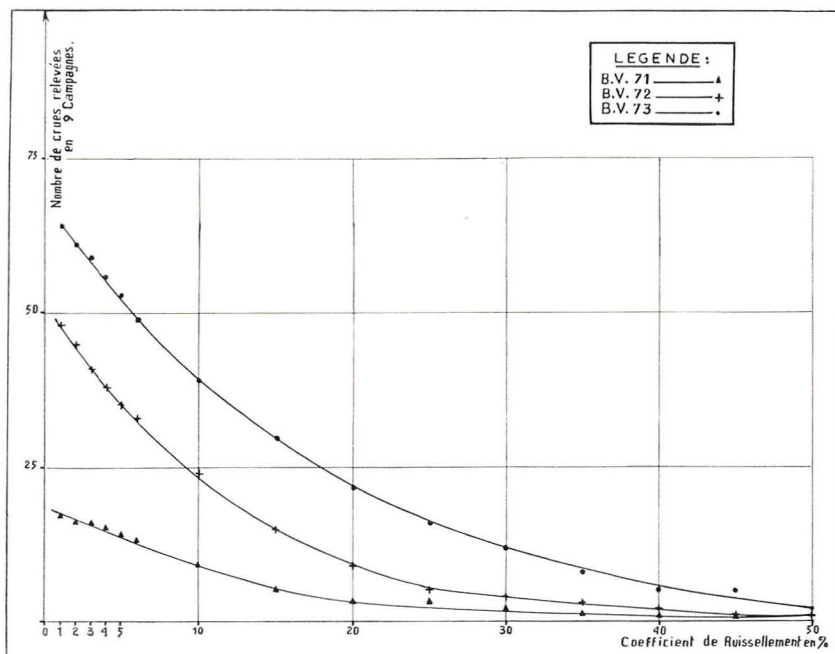


FIG. 55.



De haut en bas :

FIG. 56. — Crues classées et cumulées en fonction du coefficient de ruissellement. Périnet-Marolaona.

FIG. 57. — Crues classées et cumulées en fonction de la lame d'eau ruisselée. Périnet-Marolaona.

Le maximum de 56 % observé la première année sur le bassin 71 couvert de « savoka » montre que même sous couvert dense une large part de la pluie peut s'écouler. Le traitement en culture aménagée limite les maximums par rapport à la culture traditionnelle (64 % au lieu de 79 %).

VALEURS MAXIMALES ANNUELLES DES DÉBITS DE POINTE DE CRUE (fig. 58).

En ce qui concerne les pointes de ruissellement on a enregistré les maximums annuels en l/s/ha (Tableau n° 32).

On a pris, comme pour les grands bassins la fréquence au dépassement  $n/N + 1$  pour tracer les courbes de répartition statistique de ces valeurs. Ces courbes montrent l'influence du traitement sur le débit de pointe dont le maximum observé en 9 ans de 180 l/s/ha sur le bassin en cultures aménagées passe à 220 l/s/ha sur le bassin soumis au tavy et reste inférieur à 150 l/s/ha sur le bassin témoin.

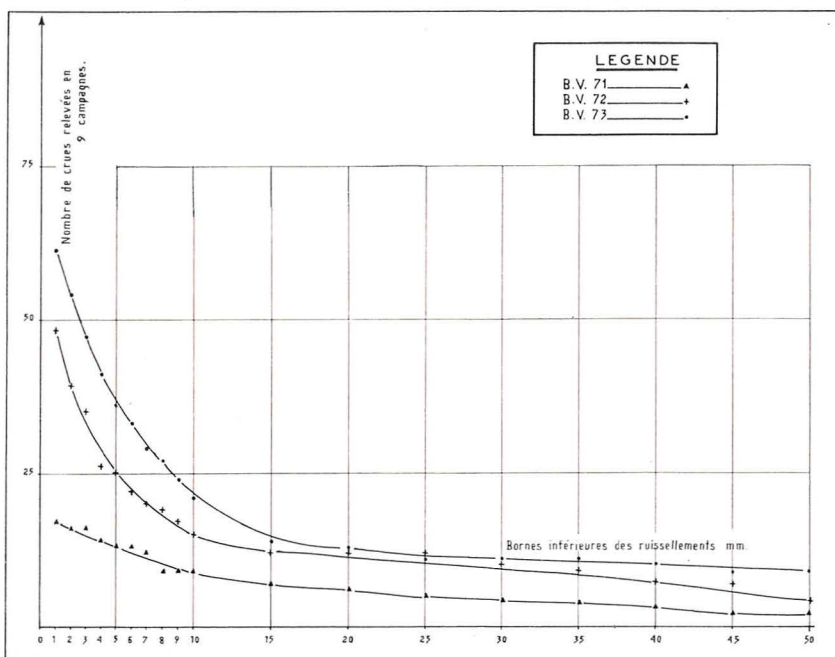


TABLEAU N° 31

Campagnes	B. V. 71 Témoin	B. V. 72 Cultures	B. V. 73 « Tavy »
1963/64	56 %	64 %	79 %
1964/65	14 %	20 %	40 %
1965/66	—	—	7 %
1966/67	—	4 %	9 %
1967/68	7 %	18 %	35 %
1968/69	1 %	19 %	31 %
1969/70	13 %	21 %	31 %
1970/71	11 %	31 %	47 %
1971/72	29 %	41 %	50 %

TABLEAU N° 32

Campagnes	B. V. 71 Témoin	B. V. 72 Cultures	B. V. 73 « Tavy »
1963/64	143	177	223
1964/65	11,7	51,0	60,3
1965/66	—	—	2,5
1966/67	—	4,4	10,0
1967/68	13,4	50,1	73,7
1968/69	0,7	32,0	52,8
1969/70	19,8	25,8	30,8
1970/71	5,7	38,5	45,6
1971/72	44,0	74,0	76,3

FIG. 58. — Périnet-Marolaona. Répartition statistique des valeurs maximales annuelles des débits de pointe de crue.

### INFLUENCES SUR LES PERTES EN TERRE.

Nous étudierons successivement :

— les pertes en matériaux lourds qui se déposent au fond de la cuve (siphonnée après chaque crue) et dont on mesure l'humidité à l'aide d'un échantillon moyen pour en déduire le poids de terre sèche,

— les pertes en matériaux fins entraînés par le courant sous forme de suspensions et qui sont estimées par l'analyse de trois prélèvements à la bouteille, au début, à la pointe et à la fin de la crue.

**Pertes en matériaux lourds** (fig. 59 et tableau n° 33).

— Sur le bassin 71 témoin couvert de savoka, les pertes en terre sont négligeables pour l'ensemble des neuf campagnes : un peu moins de 4 kg/ha en moyenne par an.

— Sur le bassin 72, la première année d'aménagement a donné une quantité de terre entraînée de 1.700 kg/ha. Les années suivantes, les pertes deviennent négligeables excepté l'année 1969-70 où l'éboulement d'un andain a provoqué une perte de 91 kg/ha.

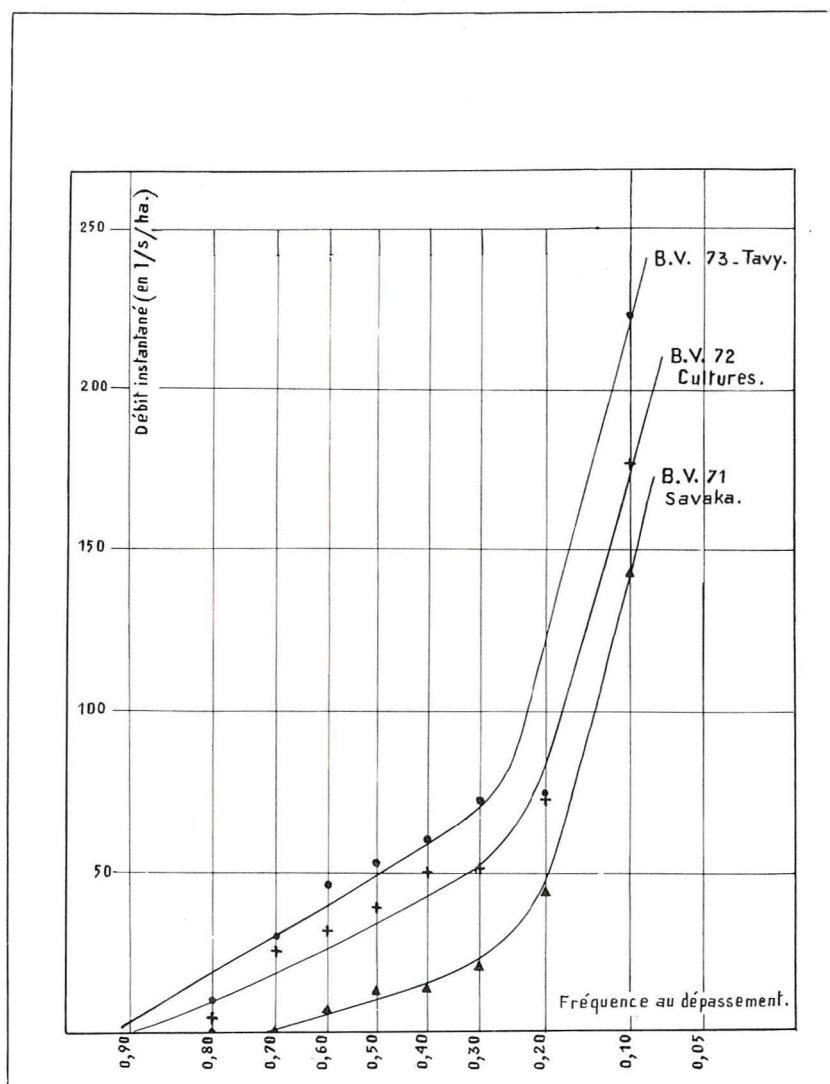
— Sur le bassin 73, la première année a vu partir 9 t par hectare puis l'année suivante la perte a été réduite à 170 kg/ha. Une fois le terrain mis en jachère, les pertes sont à peu près négligeables.

**Pertes en suspension.**

TABLEAU N° 33

En kg de terre sèche/ha

Campagnes	B. V. 71 Témoin	B. V. 72 Cultures	B. V. 73 « Tavy »
1963/64	0	1 700	9 000
1964/65	5	16	170
1965/66	0	0	0
1966/67	0	0	0
1967/68	25	12	6
1968/69	0	0	3
1969/70	9	91	1
1970/71	0	5	0
1971/72	0	2	46
Total	34	1 826	9 226



Elles ont été estimées en fractionnant la crue en trois parties et en attribuant aux débits partiels, les suspensions correspondants aux 3 échantillons recueillis.

On obtient ainsi l'estimation des pertes en suspensions suivante (en kg/ha) :

TABLEAU N° 34

Campagnes	B. V. 71 Témoin	B. V. 72 Cultures	B. V. 73 « Tavy »
1963/64	0	2 200	3 990
1964/65	0	110	600
1965/66	0	0	10
1966/67	0	10	10
1967/68	10	60	60
1968/69	20	220	70
1969/70	0	170	40
1970/71	100	850	150
1971/72	70	1 160	1 490
Total	200	4 790	6 420

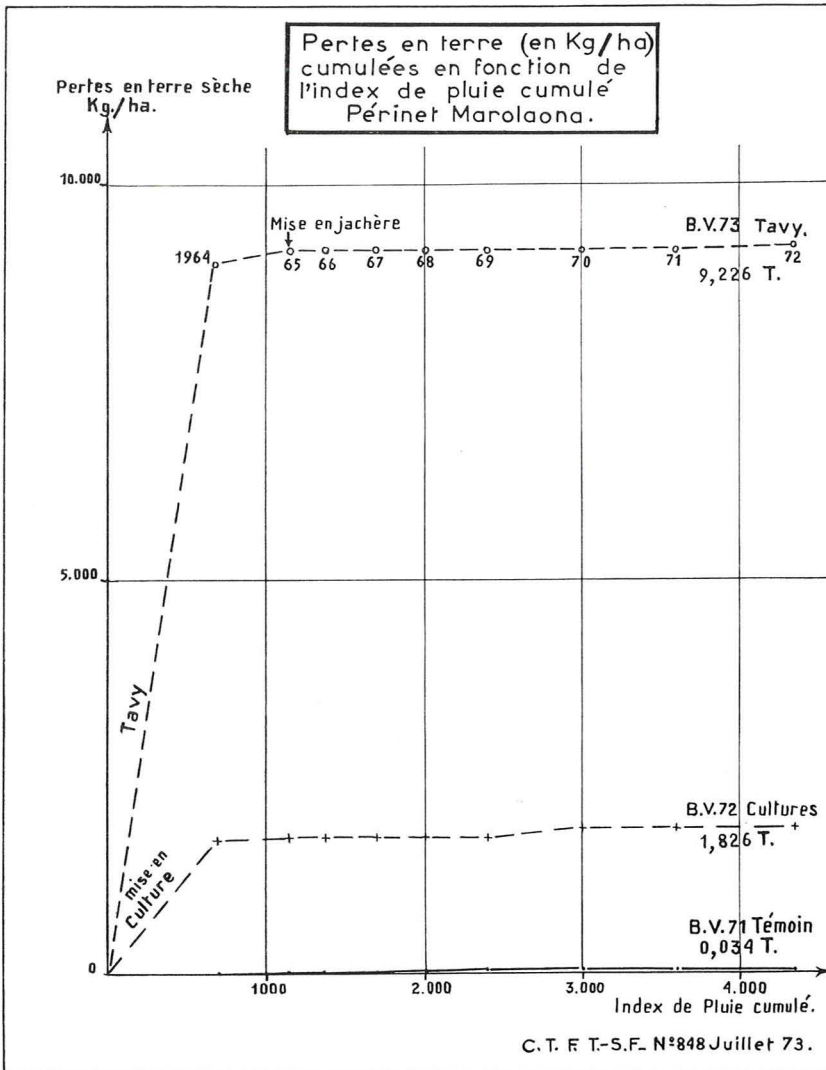


FIG. 59.

La part de l'érosion sous cette forme est loin d'être négligeable. La première année, on peut l'estimer, sur le bassin mis en culture, à 2,2 t/ha. Sur le bassin soumis au tavy, on observe presque le double : 4 t/ha.

**Récapitulation.**

Au cours de la 1<sup>re</sup> année de mise en culture, le total des pertes en éléments solides est donc le triple sur le bassin soumis au tavy (14 t/ha) que sur celui du bassin mis en culture (4 t/ha). Sur le bassin laissé en savoka, ce total est négligeable. Par la suite, la part due aux suspensions diminue du fait de la jachère sur le bassin 73, par contre, sur le bassin cultivé c'est sous forme de suspensions que l'essentiel des pertes est emporté.

**APPLICATION ET CONCLUSION.**

**Résultats.**

Les résultats obtenus sur cette expérimentation permettent d'apporter quelques éléments complémentaires à l'aménagiste et donnent des indications nouvelles qui viennent s'ajouter à celles recueillies sur les bassins D1 à D7 de Périnet, sur l'influence des couverts naturels.

Les phénomènes d'érosion risquent d'apparaître dès que l'on pratique la culture sur brûlis. En effet, 9 t/ha sont emportées la première année sous forme de pertes en élé-

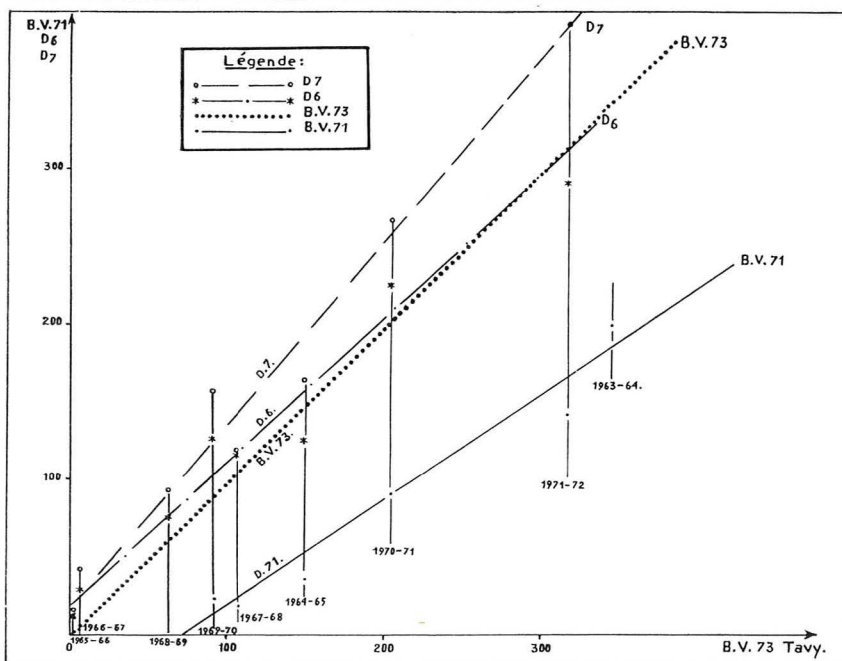


FIG. 60. — Corrélation entre les ruissellements annuels des bassins versants de Périnet-Marolaona.

ments lourds et 4 t/ha sous forme de suspensions, soit entre 10 et 15 t/ha au total, ce qui dépasse les pertes communément admises sur terrain agricole.

La reconstitution de la couverture naturelle de broussaille limite très vite ces pertes en terre, les rapprochant de celles observées dans le bassin cultivé.

Les mises en cultures pratiquées avec aménagement anti-érosif permettent de réduire considérablement les effets du déboisement sur le ruissellement.

Les crues supérieures à 10 % des précipitations qui constituent 62 % des ruissellements sur le bassin soumis au tavy ne représentent plus sur le bassin des cultures que 37 % du total. D'autre part, les pointes maximales y sont fortement diminuées (180 l/s/ha sur le B. V. des cultures, 220 l/s/ha sur le B. V. du tavy).

#### Corrélation avec les grands bassins D6 et D7.

A Marolaona, on possède donc des observations sur des bassins de petite taille :

B. V. 71 : 1,36 ha

B. V. 72 : 1,77 ha

B. V. 73 : 1,73 ha

et sur des bassins de superficie plus élevée :

D6 : 7,3 ha et D7 : 31,5 ha.

Le couvert sur ces deux bassins est assez proche de celui du bassin versant 73, nettement plus dégradé que celui du bassin versant 71.

Nous avons donc comparé les trois bassins versants B. V. 71,

#### *Bassins versants élémentaires de Périnet-Marolaona.*

De haut en bas :

— Depuis le B. V. 73, vue du B. V. 72 en cours de défriche.

— Défriche du B. V. 72 — Bassin des cultures.

— Vue de cultures sur le B. V. 72.

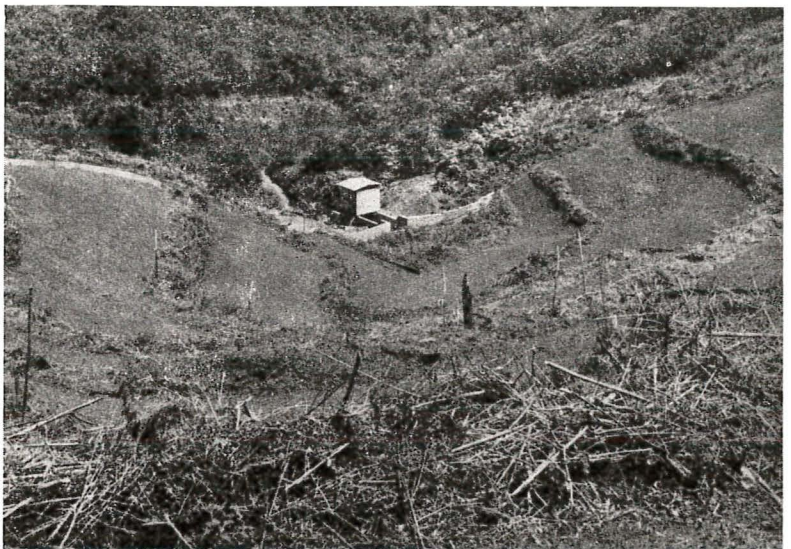




TABLEAU N° 35. — RUISSELLEMENT ANNUEL EN MM

	1964/65	1965/66	1966/67	1967/68	1968/69	1969/70	1970/71	1971/72
B. V. 71 .....	35	0	0,2	19	1	23	92	141
D6 .....	125	12	29	119	77	125	225	291
D7 .....	164	17	42	118	93	157	267	393
B. V. 73 .....	150	4	8	107	63	92	205	318

D6 et D7 en fonction du B. V. 73 au point de vue ruissellement annuel (1).

On observe :

— une corrélation très nette entre le bassin versant 71 et le bassin versant 73.

$$\bullet R(\text{B. V. 71}) = 0,77 \times R(\text{B. V. 73}) - 70.$$

R : volume annuel ruisselé en mm.

La faible dispersion des points autour de cette droite permet de conclure à une bonne homogénéité des résultats.

— Entre D6 et le bassin versant 73 on observe aussi une droite de corrélation.

$$\bullet R(\text{D6}) = 0,92 \times R(\text{B. V. 73}) + 20.$$

Ce qui montre que le volume ruisselé sur le bassin D6 est très voisin de celui observé sur le petit bassin versant élémentaire : bassin versant 73. La dispersion des points est faible et montre l'intérêt représenté par un petit bassin pour l'esti-

mation du ruissellement annuel pour de plus grandes surfaces.

— Entre D7 et le bassin versant 73.

$$\bullet R(\text{D7}) = 1,16 \times R(\text{B. V. 73}) + 20.$$

La valeur supérieure observée entre D6 et D7 peut s'expliquer par le fait que le bassin D6 est relativement plus couvert par une savoka âgée que le bassin D7.

#### EN CONCLUSION :

Les éléments dégagés par l'étude réalisée sur l'effet des mises en culture sur brûlis et des cultures aménagées, permettent de définir des solutions pratiques pour préserver les facteurs naturels de production.

L'aménagement de la zone forestière devra donc prendre en considération ces résultats ainsi que ceux relevés sur les effets du manteau forestier signalés dans les paragraphes précédents.

## INFLUENCE DE LA MISE EN VALEUR DES STEPPES A GRAMINÉES DES HAUTS-PLATEAUX

### INFLUENCE DU COUVERT SUR LE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL.

#### Ruissellement global.

Les volumes des ruissellements annuels en mm sont indiqués dans le tableau n° 36. On a aussi présenté dans ce tableau le pourcentage du

ruissellement par rapport à celui observé au bassin n° 3 (prairie brûlée). La figure n° 61 reprend les ruissellements annuels (en cartouche) et les ruissellements cumulés en fonction de la pluviométrie cumulée (2).

Du tableau n° 36 on peut tirer quelques valeurs particulières.

(1) Le bassin versant 72, de couvert différent (cultures) n'a pas été pris en considération.

(2) On a dû, lors de la campagne 1972-73, procéder à des extrapolations pour plusieurs crues dans le cas du bassin n° 1 à partir de la figure n° 62.

TABLEAU N° 36. — BILAN DE L'EAU A MANANKAZO. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES

Campagne	Pluv. moy. mm	B. V. 1 Défens			B. V. 2 Cultures			B. V. 3 Brûlé		B. V. 4 Rebois.		
		Vol.	Coef.	%	Vol.	Coef.	%	Vol.	Coef.	Vcl.	Coef.	%
		mm	%	B. V. 3	mm	%	B. V. 3	mm	%	mm	%	B. V. 3
1962/63	1.558	150,8	9,7	68,3	71,2	4,6	32,3	220,7	14,1	103,0	6,6	46,7
1963/64	1.721	128,4	7,5	57,0	31,3	1,8	13,9	225,3	13,1	70,1	4,1	31,1
1964/65	2.127	204,5	9,6	69,3	27,9	1,3	9,5	295,2	13,9	62,2	2,9	21,1
1965/66	1.478	54,9	3,7	37,5	8,2	0,6	5,6	146,3	9,9	26,9	1,8	18,4
1966/67	1.434	31,9	2,2	30,1	6,7	0,5	6,3	105,9	7,4	2,7	0,2	2,5
1967/68	1.743	65,9	3,8	40,4	27,1	1,6	16,6	163,0	9,4	5,1	0,3	3,1
1968/69	1.546	21,9	1,4	22,2	13,2	0,9	13,4	98,4	6,4	3,7	0,2	3,8
1969/70	1.731	54,1	3,1	40,3	33,3	1,9	24,8	134,2	7,8	3,6	0,2	2,7
1970/71	2.019	210,7	10,4	58,4	130,7	6,5	36,2	360,9	17,9	49,6	2,5	13,7
1971/72	1.934	190,4	9,8	61,5	126,7	6,6	40,9	309,5	16,0	116,1	6,0	37,5
1972/73	2.155	216,5	10,0	57,9	45,8	2,1	12,2	374,2	17,4	23,9	1,1	6,4
Moyenne	1.768	120,9	6,5	49,4	47,5	2,6	19,2	221,2	12,1	42,4	2,4	17,0

TABLEAU N° 37

	B. V. 1 Prairie en défense	B. V. 2 Cultures	B. V. 3 Prairie brûlée	B. V. 4 Reboisement
Volume moyen ruisselé en mm . . . . .	120,9	47,5	221,2	42,4
Volume maximum annuel en mm . . . . .	210,7	130,7	374,2	116,1
Volume minimum annuel en mm . . . . .	21,9	6,7	98,0	2,7

On constate tout d'abord la faible partie ruisselée par rapport à la quantité de pluie précipitée. Sur 11 campagnes les moyennes sont les suivantes :

- 6,5 % Prairie en défens B. V. 1.
- 2,6 % Cultures B. V. 2.
- 12,1 % Prairie brûlée B. V. 3.
- 2,4 % Reboisement B. V. 4.

En effet, du fait de la petite taille des bassins, on observe uniquement des ruissellements superficiels.

L'effet de la couverture végétale et des aménagements sur le ruissellement annuel est très net : le bassin couvert de prairie soumise au brûlis ruisselle presque deux fois plus que la prairie en défens (ruissellement annuel moyen B. V. 1 = 49,4 % du B. V. 3).

Les cultures (B. V. 2) et le reboisement (B. V. 4) limitent de façon importante ce ruissellement ; l'effet du reboisement se faisant particulièrement sentir à partir de la quatrième campagne.

**Ruissellement instantané.**

CLASSEMENT EN FONCTION DU COEFFICIENT DE RUISSÈLEMENT.

Comme pour les bassins de Périnet, nous n'avons considéré comme « ruissellement » que ceux dont l'écoulement est supérieur à 1 % de la pluviométrie correspondante. Les onze années d'étude permettent de classer un nombre élevé de crues sur les quatre bassins (fig. n° 62).

Nous obtenons ainsi les valeurs suivantes :

TABLEAU N° 38

N° B. V.	Nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 %	20 %	10 %	5 %	1 %
1 Prairie en défens . . . . .	2	44	78	104	132
2 Cultures . . . . .	0	6	23	53	132
3 Prairie brûlée . . . . .	14	100	151	191	237
4 Reboisement . . . . .	0	9	15	28	80

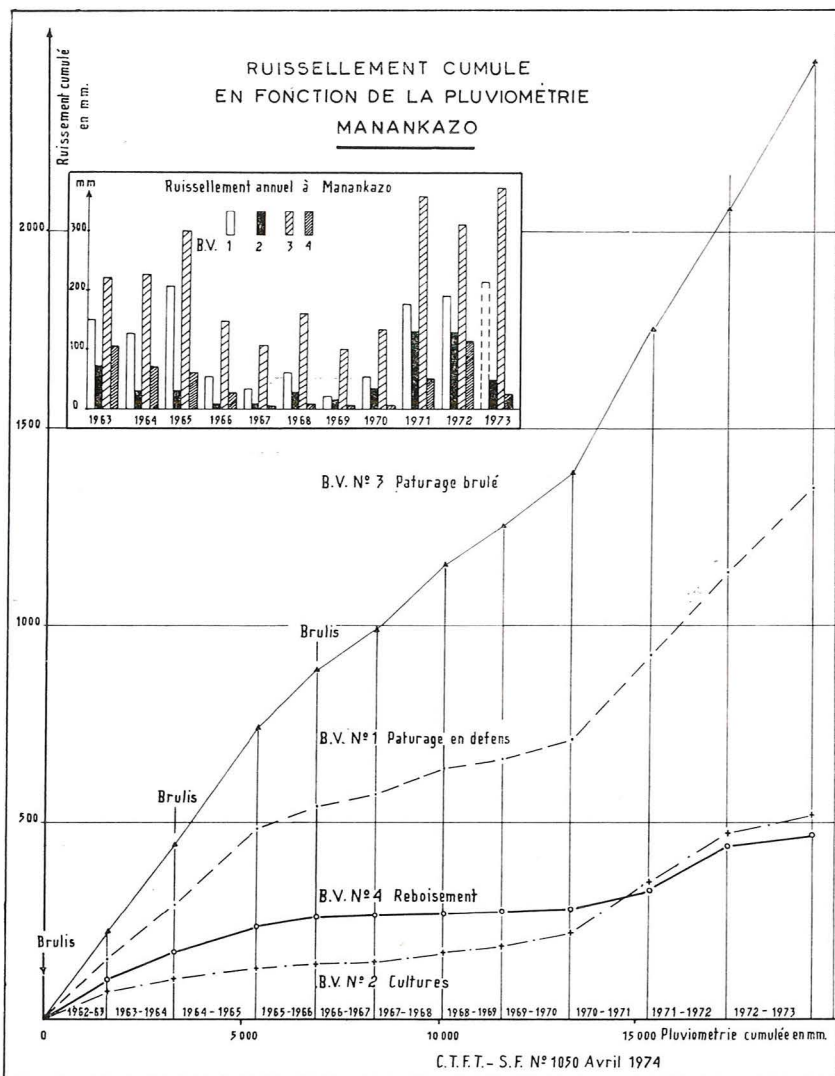


FIG. 61.

L'importance de la couverture végétale sur la nature du ruissellement apparaît nettement au moyen de ce classement. S'il n'existe pas de ruissellement supérieur à 50 % sur les bassins aménagés, par contre sur le bassin en prairie brûlée on observe 14 crues supérieures à cette valeur, et 2 sur le bassin mis en défens. Sur la figure n° 63 on constate la différence de nature du ruissellement entre le bassin en prairie en défens et le bassin cultivé : sur ces deux bassins on a enregistré le même nombre de crues (132) ; sur la prairie en défens plus de la moitié des crues sont supérieures à 10 %, sur le bassin mis en cultures la moitié des crues est inférieure à 5 %.

CLASSEMENT EN FONCTION DE LA LAME D'EAU RUISSELÉE (en mm).

Nous obtenons les valeurs indiquées dans le tableau n° 39.

Ce classement est représenté sur la figure n° 64. Sur le tableau ci-après les résultats sont représentés en % du nombre total de crues enregistrées au bassin n° 3. Un tiers des ruissellements sont donc supérieurs à 10 mm sur le bassin en prairie brûlée, un cinquième sur le bassin en défens, et seulement un vingtième sur les bassins des cultures et de reboisement.

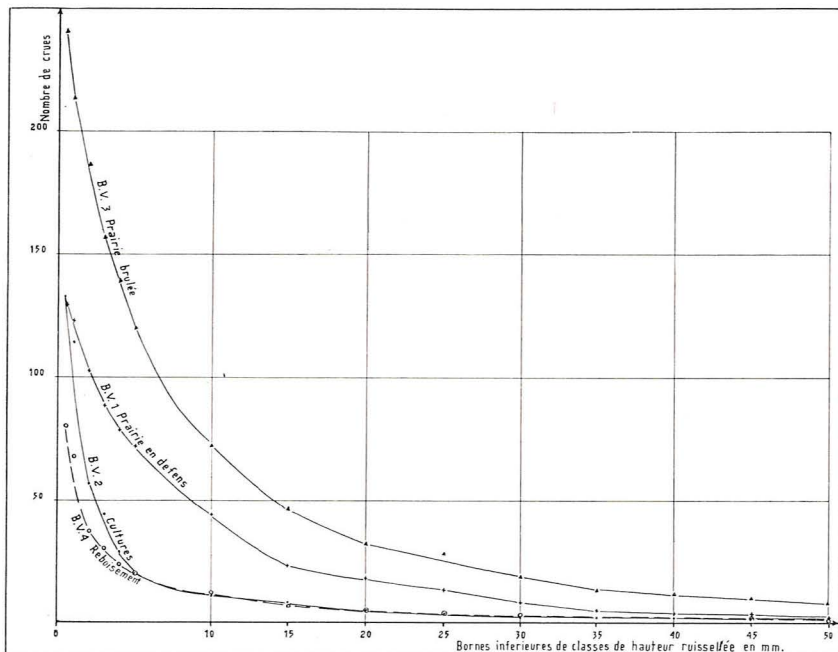
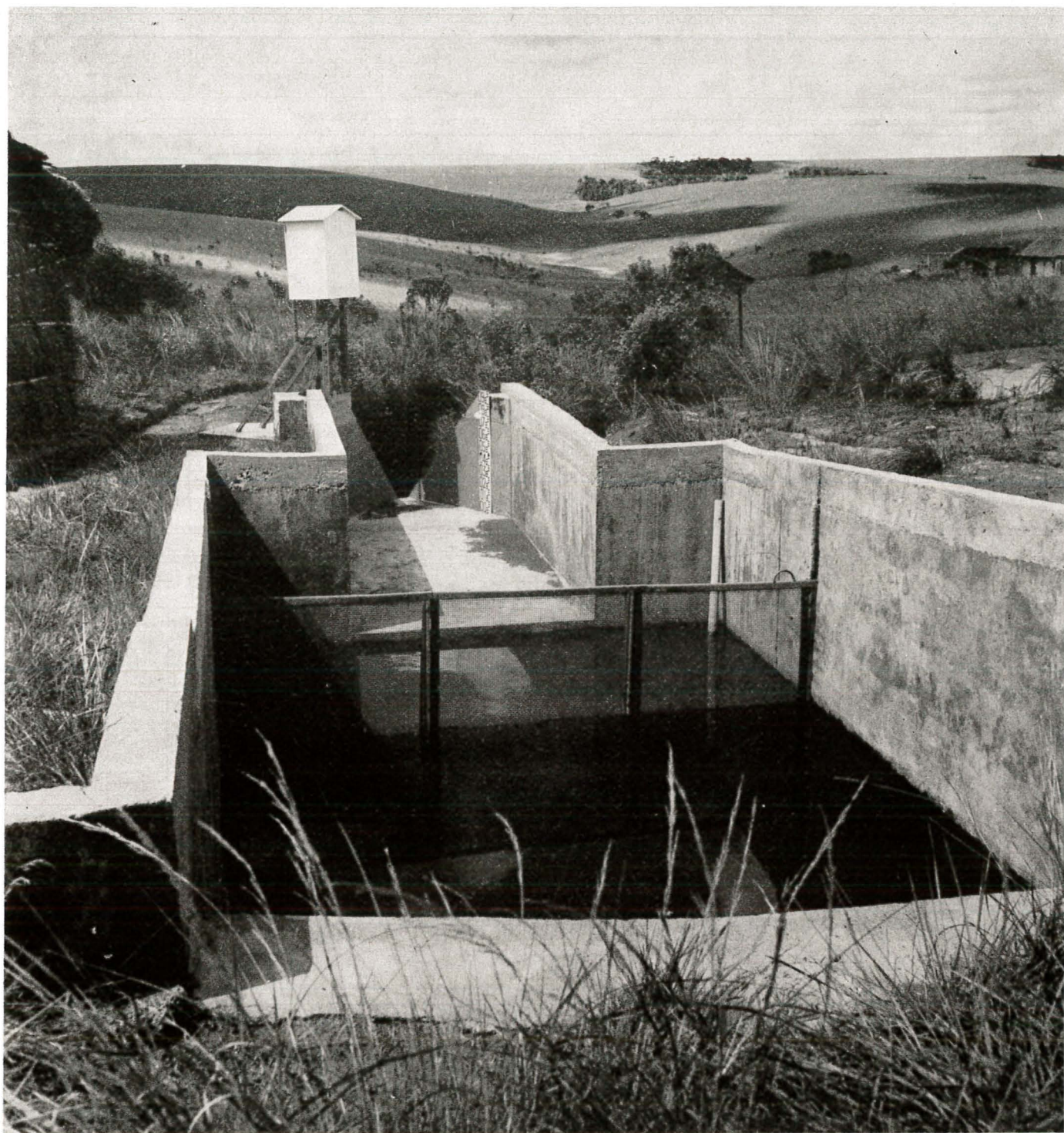


FIG. 62. — Crues classées et cumulées en fonction du coefficient de ruissellement, en %, à Manankazo.



Aménagements sur le B. V. 2 des cultures à Manankazo. Déversoir type H sur le B. V. 2.

TABLEAU N° 39

N° du B. V.	% du nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 mm	20 mm	10 mm	5 mm	Total
1 Prairie en défens . . .	1 %	8 %	18 %	30 %	55 %
2 Cultures	1 %	2 %	5 %	8 %	55 %
3 Prairie brûlée . . .	3 %	13 %	33 %	50 %	100 %
4 Reboisement . . . .	0 %	2 %	5 %	8 %	33 %

VALEURS MAXIMALES DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT.

Les maximums atteints annuellement par le coefficient de ruissellement sur les quatre bassins sont indiqués dans le tableau n° 40 (en %).

On a tracé les courbes enveloppes des coefficients maximums de ruissellement en fonction des précipitations (fig. n° 65). Les courbes montent très vite (surtout dans le cas des bassins en prairie) puis s'aplatissent peu à peu à partir des valeurs de pluie supérieures à 50 mm. On obtient alors les valeurs presque limites du coefficient de ruissellement.

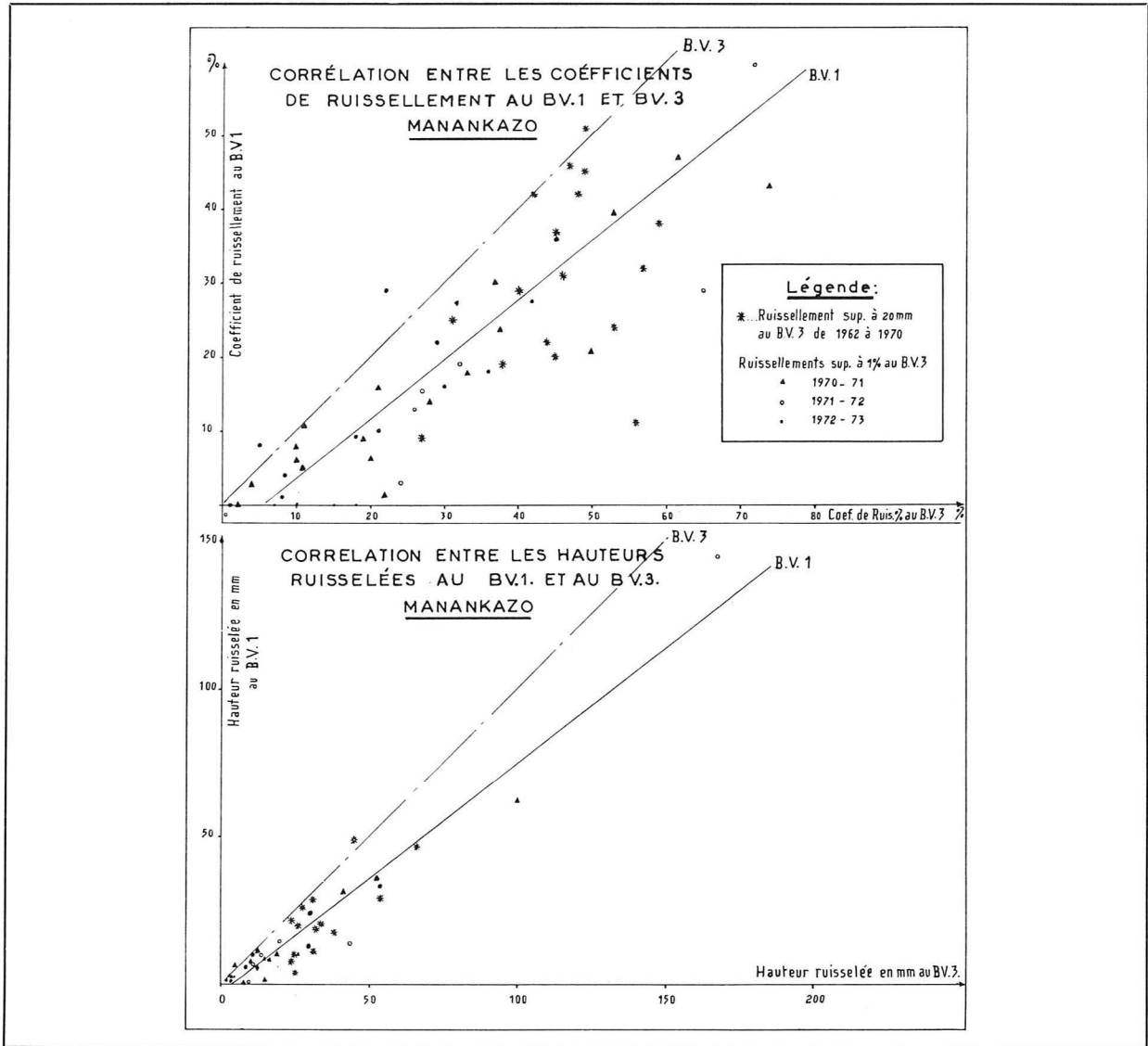


Fig. 63.

TABEAU N° 40

Campagnes	Bassin 1 Prairie défens	Bassin 2 Cultures	Bassin 3 Prairie brûlée	Bassin 4 Reboisement
1962/63	51	35	59	43
1963/64	47	18	57	25
1964/65	46	10	49	25
1965/66	31	6	56	17
1966/67	24	6	51	2
1967/68	42	13	48	5
1968/69	13	5	39	3
1969/70	22	13	44	3
1970/71	47	42	<b>74</b>	26
1971/72	<b>60</b>	<b>42</b>	72	<b>45</b>
1972/73	36	14	61	9

VALEURS MAXIMALES ANNUELLES DES DÉBITS DE POINTE DE CRUE (fig. n° 66).

En ce qui concerne les pointes de crues les maximums annuels en l/s/ha sont indiqués dans le tableau n° 41:

TABEAU N° 41

Campagnes	B. V. 1 Prairie Défens	B. V. 2 Cultures	B. V. 3 Prairie brûlée	B. V. 4 Reboisement
1962/63	135	100	140	<b>90</b>
1963/64	120	33	255	30
1964/65	140	41	<b>270</b>	84
1965/66	125	29	220	19
1966/67	79	14	131	5
1967/68	72	40	172	4
1968/69	65 *	13	109	5
1969/70	99	44	94	8
1970/71	<b>146</b>	<b>119</b>	204	40
1971/72	106	93	120	80
1972/73	110 *	40	221	7

\* Résultats extrapolés.

La fréquence au dépassement prise pour tracer les courbes (fig. n° 66) est toujours de  $n/N + 1$ .

Ces valeurs confirment l'effet du brûlis sur l'augmentation des pointes de crues, qui, plus que la quantité totale d'eau écoulee pendant les crues, sont la cause des dommages occasionnés par le ruissellement.

Le maximum observé sur le bassin en prairie brûlée atteint la valeur de 270 l/s/ha, il n'est plus que de 146 l/s/ha sur la prairie en défens, dont on constate ainsi le rôle conservatoire.

Pour les bassins où, du fait de l'aménagement, l'infiltration joue un rôle beaucoup plus important, on observe deux segments de droite.

En effet, pour les crues se produisant sur sol saturé d'eau (cas de deux averses successives ou de cyclone) la capacité d'absorption du sol

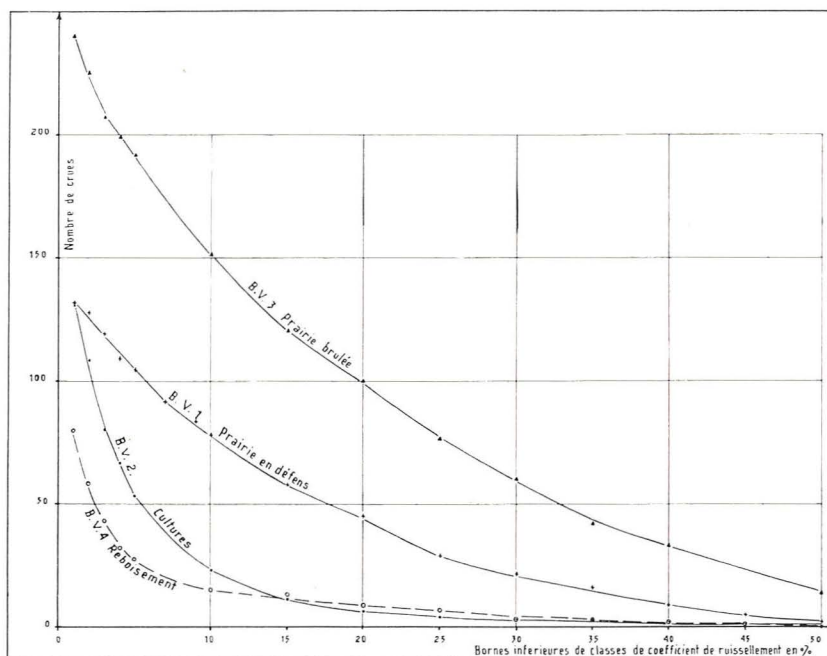


FIG. 64. — Crues classées et cumulées en fonction de la lame d'eau cumulée à Manankazo.

Manankazo. Crues du 9 février 1968 au déversoir B V 3. Prairie brûlée.



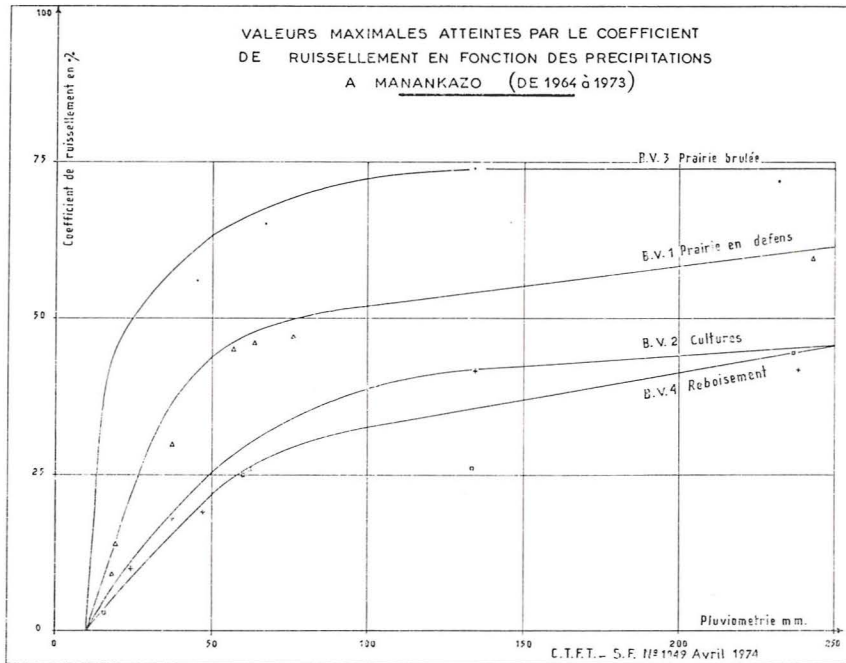


FIG. 65.

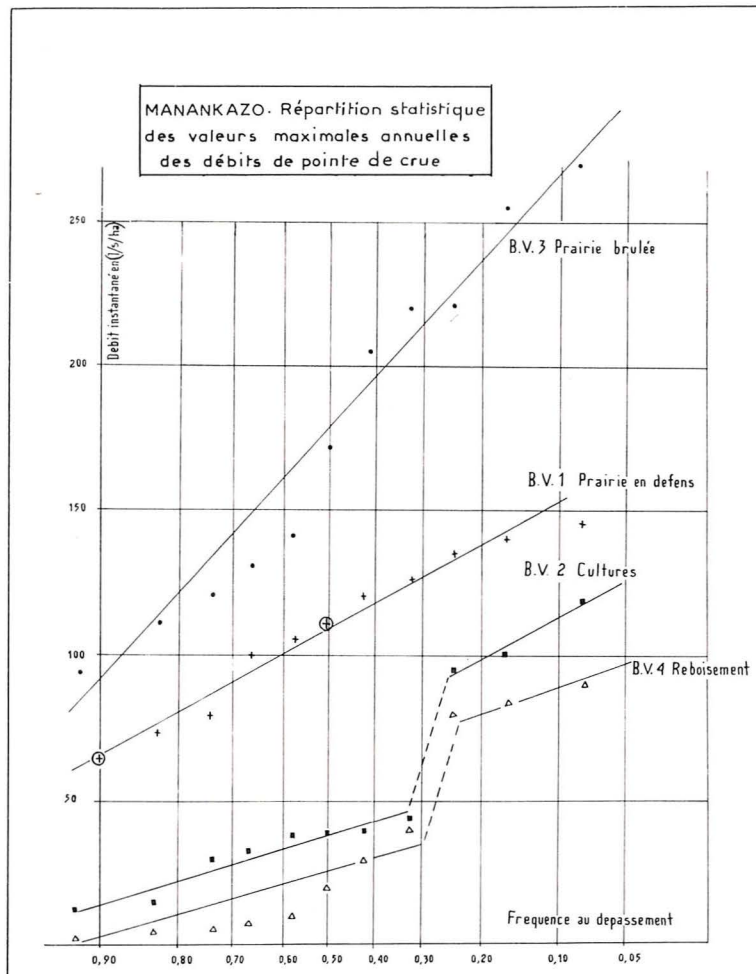


FIG. 66.

est voisine du maximum et une forte proportion de l'averse ruisselle.

Pour les crues où l'humidification du sol n'est pas à l'état de saturation les pointes de crues restent faibles, une partie importante de l'averse pouvant s'infiltrer.

#### INFLUENCE DU COUVERT SUR L'EAU DANS LE SOL.

Nous reprendrons ci-après les résultats déjà publiés lors du Colloque sur l'Energie nucléaire et ses applications biologiques à Madagascar (mai 1971) (1), en y incluant, pour certains des dispositifs, les mesures réalisées depuis cette époque et qui dans l'ensemble confirment les premières conclusions tirées.

Le tableau ci-après indique la répartition des tubes d'accès de sonde installés et suivis au cours de la période allant d'octobre 1967 à avril 1973.

Nous voyons que seuls les tubes des bassins n<sup>os</sup> 1-3 et 4 ont été suivis durant toute la période (plus de 5 campagnes) avec cependant une densité de mesures beaucoup plus faible depuis 1970. Le bassin n<sup>o</sup> 2 a été suivi sous cultures et sous prairie artificielle uniquement pendant 2 ans  $\frac{1}{2}$  et ensuite uniquement dans la partie basse du bassin sous peupliers durant 1 an environ.

En ce qui concerne les comparaisons pins-prairies naturelles (brûlées ou en défens) nous disposons donc de résultats portant sur une période plus

(1) Contrôle neutronique de l'humidité des sols sur bassins versants expérimentaux dans la région des Tampo-ketsa de Madagascar par P. MOUTONNET et G. BENOIT de COIGNAC, *Terre Malgache*, n<sup>o</sup> Spécial 12.

longue qui seront donc beaucoup plus valables que ceux concernant les prairies artificielles. En ce qui concerne les résultats obtenus sous peupliers ils ne permettent pas encore leur exploitation.

#### Besoins hydriques des végétaux.

On a classé chaque campagne en 2 saisons : la saison chaude et pluvieuse qui correspond à la saison de végétation et la saison froide et sèche (H = hiver) qui correspond à la saison d'arrêt de végétation (mai à octobre) avec des consommations très faibles dépassant rarement 1 mm/j.

La saison chaude a été elle-même découpée en trois périodes suivant que l'on suppose ou non l'existence de percolation au-dessous de la zone étudiée (5,60 m).

— La période P (Printemps) correspond au début de la saison de végétation (octobre-décembre) au cours de laquelle les réserves du sol se reconstituent alors que la consommation (E. T. R.) (2) recommence à croître.

Nous avons arbitrairement limité cette période à celle où nous sommes sûrs qu'il n'y a aucun risque de percolation au-dessous de 5,60 m (réserves non reconstituées en profondeur).

— La période E (Eté) correspond à la pleine saison des pluies (décembre-mars) au cours de laquelle l'ensemble du profil atteint sa capacité de rétention. C'est la période du maximum de consommation par les végétaux, mais cette consommation n'étant pas dissociable de la percolation,

(2) Evapotranspiration réelle : Utilisation réelle par le sol et la plante.

TABLEAU N<sup>o</sup> 42

Répartition des Tubes d'accès de Sonde à neutrons

B. V. n <sup>o</sup>	Couverture végétale	Tube n <sup>o</sup>	Profondeur	Situation des tubes	Période de Mesure
3	Prairie naturelle brûlée tous les deux ans	1	6 m	— Situé au milieu du bassin	Oct. 1967 à Avr. 1973
4	Reboisement de <i>Pinus patula</i> de 6-7 ans sur sous-solage + billon en courbes de niveau	2	6 m	— Situé sur la ligne de sous-solage + billonnage entre deux arbres	—
		3	6 m	— Situé dans l'interligne non travaillé	
2	Cultures en terrasses suivant les courbes de niveau avec rotation culturale (4 années de cultures, 3 années de prairie artificielle)	5	3 m	— Bas du bassin sur prairie de <i>Melinis</i>	Oct. 1967 à Fév. 1970
		6	3 m	— Bas du bassin sur Maïs puis sur prairie de <i>Brachiaria</i> a/c 1.12.68	
		7	3 m	— Haut du bassin sur Maïs puis sur prairie de <i>Melinis</i> a/c 1.12.68	
		8	3 m	— Haut du bassin sur prairie <i>Melinis</i>	
2	Peuplier sur sous-solage sarclé en bas du bassin	P1	3 m	— Sur la raie de sous-solage	Oct. 1971 à Déc. 1972
		P2	3 m	— Sur l'inter-bande	
1	Prairie naturelle mise en défens	9	3 m	— Situé au milieu du bassin	Oct. 1967 à Avr. 1973



TABLEAU N° 43. — CONSOMMATION MOYENNE SOUS PRAIRIE NATURELLE ET SOUS PINS  
(y compris la percolation éventuelle)

Périodes	Nbre de périodes	Durée moyenne (jours)	Prairie naturelle			Pins sur sous-solage + billonnage					
			(1) Brûlée		(9) Témoin	(2) Billon		(3) Inter-bil.		(2) + (3) Moy.	
			2,4 m	5,6 m	2,4 m	2,4 m	5,6 m	2,4 m	5,6 m	2,4 m	5,6 m
Saison chaude (P) Début de végétation	5	73	• 5,33	4,56	• 5,63	• 5,33	4,93	• 5,88	5,67	• 5,61	5,30
(E) Maximum y compris la percolation	5	91	• 10,32	• 9,79	• 11,41	• 11,29	• 10,36	• 11,72	• 9,97	• 11,51	• 10,17
(A) Fin de végétation	4	104	3,71	4,08	4,29	4,69	5,49	4,73	5,51	4,71	5,50
moyenne P + A 2	9	88	• 4,52	4,32	• 4,96	• 5,01	5,21	• 5,31	5,59	• 5,16	5,40
(H) Hiver (saison sèche)	4	134	0,67	1,02	0,72	0,93	1,26	0,74	1,20	0,84	1,23

(•) Percolation probable ou certaine.

les résultats obtenus sont surestimés et ne sont pas utilisables pour la détermination des besoins hydriques.

— La période A (Automne), enfin, correspond à la fin de la saison de végétation (mars-mai) au cours de laquelle les pluies se faisant plus rares et les besoins de végétaux étant encore importants il y a un début d'utilisation des réserves du sol et donc arrêt de la percolation.

— Les valeurs moyennes des consommations journalières (en mm/j) observées sur les tubes 1, 2, 3 et 9 (Prairies naturelles et Pins) ont été reportées sur le tableau n° 43. Ces consommations ont été mesurées sur 2,40 m pour tous les tubes et sur 5,60 m pour les tubes de 6 m (nos 1, 2 et 3). Pour ces derniers, lorsque la « consommation » sur 5,60 m est inférieure à celle observée sur 2,40 m (1) cela signifie simplement qu'il y a eu percolation au-dessous de 2,40 m (augmentation des réserves entre 2, 4 et 5,6 m) d'où surestimation de la « consommation » sur les horizons de surface. Par contre, si la « consommation » sur 5,60 m est supérieure à celle observée sur 2,40 m (2) c'est qu'il y a utilisation des réserves entre 2,4 et 5,6 m et que l'E. T. R. mesurée sur 2,40 m est sous-estimée. Ces remarques sont très importantes en ce qui concerne les estimations de l'E. T. R. à l'aide des tubes de 3 m. Enfin, comme nous l'avons dit plus haut, la « consommation » durant l'Été cumule à la fois l'E. T. R. et la percolation au-dessous de 5,60 m (plus ou moins importante) et surestime d'une façon générale la quantité d'eau réellement utilisée par la végétation.

(1) Cas fréquent au « Printemps ».

(2) Cas fréquent en « Automne » et en « Hiver ».

En ce qui concerne les pins, nous voyons que la consommation moyenne au cours des périodes (P) et (A) s'établit autour de 5,40 mm/j avec une consommation un peu plus forte au Printemps et un peu inférieure en Automne. Au cours de ces périodes, il apparaît cependant une consommation moins élevée (5,11 mm/j) au niveau du billon sous-solé que dans l'inter-billon (5,59 mm/j); cela semble dû au fait que, durant la saison des pluies (E), la « consommation » se fait surtout dans le billon (10,35 mm/j) qui utilise plus d'eau que l'inter-billon (9,97 mm/j). De ce fait, le billon s'asséchant plus vite que l'inter-billon dès qu'il ne pleut plus, la consommation s'inverse au cours des périodes extrêmes (P et A). Nous étudierons ce problème plus en détail ci-après.

Pour la prairie, la « consommation » (sur 2,4 m) est toujours plus forte sous prairie naturelle en défens (4,96 mm/j) que sous prairie brûlée (4,52 mm/j) ce qui est normal, mais la différence s'accroît quand on passe du début à la fin de la saison de végétation (+ 0,30 à + 0,58 mm/j). Si l'on suppose que l'utilisation des réserves entre 2,4 et 5,6 m est du même ordre sous les deux couverts l'utilisation globale moyenne s'établit à 4,32 mm/j sous prairie brûlée et 4,76 mm/j sous prairie témoin.

Sous culture enfin et, en particulier, sous prairie artificielle (*Melinis* ou *Brachiaria*), comme il est impossible de déterminer la part percolée au-dessous de 2,40 m au cours de l'« Été » et même au cours du « Printemps », nous ne considérerons que les résultats des périodes où nous sommes sûrs de ne pas avoir de percolation, c'est-à-dire l'Automne et l'Hiver. Le tableau n° 44 reprend les résultats des deux campagnes en ce qui concerne la prairie natu-

TABLEAU N° 44. — CONSOMMATION SOUS PRAIRIE NATURELLE ET ARTIFICIELLE ET CULTURES, DURANT L'AUTOMNE ET L'HIVER (en mm/j) ANNÉES 1968 et 1969

Période	Année	Durée Jours	Prairie naturelle		Cultures Prairie artificielle et Maïs (M)				
			(1) Brûlée	(9) Témoin	(5) Bas	(6) Bas	(7) Haut	(8) Haut	Moyenne Prairie
(A) Fin de végéta- tion	1968	41	3,02	3,63	4,27	M 2,85	M 3,78	4,02	4,15
	1969	83	2,84	4,60	4,35	4,65	4,65	4,88	4,63
	Moy.	62	2,93	4,11	4,31	4,64	4,65	4,45	4,51
(H) Hiver saison sèche	1968	195	0,77	0,83	0,98	M 0,64	M 0,70	0,90	0,94
	1969	132	0,78	0,83	0,98	1,22	1,33	0,92	1,11
	Moy.	165	0,77	0,83	0,98	1,22	1,33	0,92	1,11

relle et le bassin des cultures. Ce tableau nous montre que la consommation sous prairie artificielle est en général plus forte que sous prairie naturelle (même en défens). Cette consommation supplémentaire est en gros de 0,20 à 0,40 mm/j en « Automne » et un peu moins en « Hiver ». Par contre, le maïs — qui, en Automne est en fin de végétation et en Hiver en Jachère — présente une consommation beaucoup plus réduite que la prairie témoin durant ces deux mêmes périodes. En saison de végétation (E) il semble plus exigeant mais cela peut être dû à une percolation supérieure et nous ne pouvons absolument rien conclure à ce sujet.

Si nous supposons arbitrairement que l'absorption racinaire est du même ordre de grandeur entre 2,40 et 5,60 m pour tous les types de prairie (brûlée, en défens, artificielle), nous pouvons estimer les consommations en mm/j des différents couverts (tableau n° 45).

TABLEAU N° 45

Couverture	Saison chaude (P + A)	Saison froide
Pins (Moy.) . . . . .	5,40	1,23
Prairie brûlée . . . . .	4,32	1,02
Prairie témoin . . . . .	4,76	1,07
Prairie artificielle . . . . .	5,20	1,22
Maïs + Jachère (1) . . . . .	(3,30)	(0,70)

(1) Ces estimations concernent uniquement l'« Automne » et l'« Hiver » 1968 donc l'époque de fin de végétation du Maïs et la Jachère qui suit cette culture.

A partir de ces résultats, on peut essayer d'établir pour une campagne moyenne, le bilan hydrique porté dans le tableau n° 46, en supposant que la consommation en « Été » est du même ordre de grandeur que celle observée au « Printemps » et en « Automne » ce qui très probablement sous-estimé.

TABLEAU N° 46. — BILAN HYDRIQUE ANNUEL MOYEN SOUS DIVERSES COUVERTURES VÉGÉTALES

	Durée moyenne jours 1967/73	Prairie naturelle		Pins moyenne mm	Durée moyenne jours 1967/70	Prairie artificielle moyenne mm	Prairie naturelle Témoin mm
		Brûlée mm	Témoin mm				
Pluviométrie moyenne	(P) ..	73	297	295	50	438	443
	(E) ..	91	1.192	1.207	88	943	935
	(A) ..	104	314	332	62	207	214
	(H) ..	134	48	49	50	60	60
Total . . . . .	402	1.851	1.857	1.884	365	1.648	1.652
Ruissellement moyen.		240	127	34		25	45
Consommation globale (E. T. R.)							
— Saison chaude (P + E + A) . . . . .	268	1.158	1.329	1.447	200	1.040	966
— Saison froide (H) . . . . .	134	137	96	165	165	201	198
Total . . . . .	402	1.295	1.425	1.612	365	1.241	1.164
Percolation supposée (E) . . . . .		316	305	238		382	443

Parmi les modes de mise en valeur du sol, le reboisement se révèle, à deux égards, le système le plus adapté de protection du sol :

— d'une part, le ruissellement des eaux de surface est pratiquement éliminé alors qu'il reste important sur la prairie brûlée (8 %) et moyen sur les bassins versants n° 1 et 2.

— d'autre part, la quantité d'eau percolée en saison des pluies est réduite aux 2/3. Ceci tient à des besoins hydriques de saison des pluies légèrement supérieurs à ceux observés sur prairie naturelle (200 mm environ).

En saison fraîche, la croissance des arbres est pratiquement arrêtée, si bien que l'on n'assiste pas au dessèchement des tanety (1), si redouté des riziculteurs des bas-fonds. Les réserves facilement utilisables (R. F. U.) restent toujours largement excédentaires dans les horizons profonds et peuvent, par percolation lente, alimenter durant toute la saison sèche les sources de bas de pente.

#### Développement racinaire des plants (2).

L'utilisation des informations fournies par la sonde à neutrons suivant les horizons successifs du sol, permet de définir verticalement le développement racinaire du couvert végétal. On détermine au cours du temps et par horizon l'amplitude moyenne de la variation du stock d'eau exprimée en mm.

#### PRAIRIE BRÛLÉE ET PINS.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau n° 47 pour les tubes 1, 2 et 3.

(1) Tanety : colline des Hauts-Plateaux Malgaches.

(2) Remarque : Le « Développement ou Profil racinaire » dont il est question dans ce §, n'implique pas la présence effective des racines, mais représente plutôt la zone d'influence du système racinaire y compris les variations de proche en proche dues aux différences de potentiel capillaire entre horizons.

Ces valeurs sont reprises sur la figure n° 67 où l'on donne :

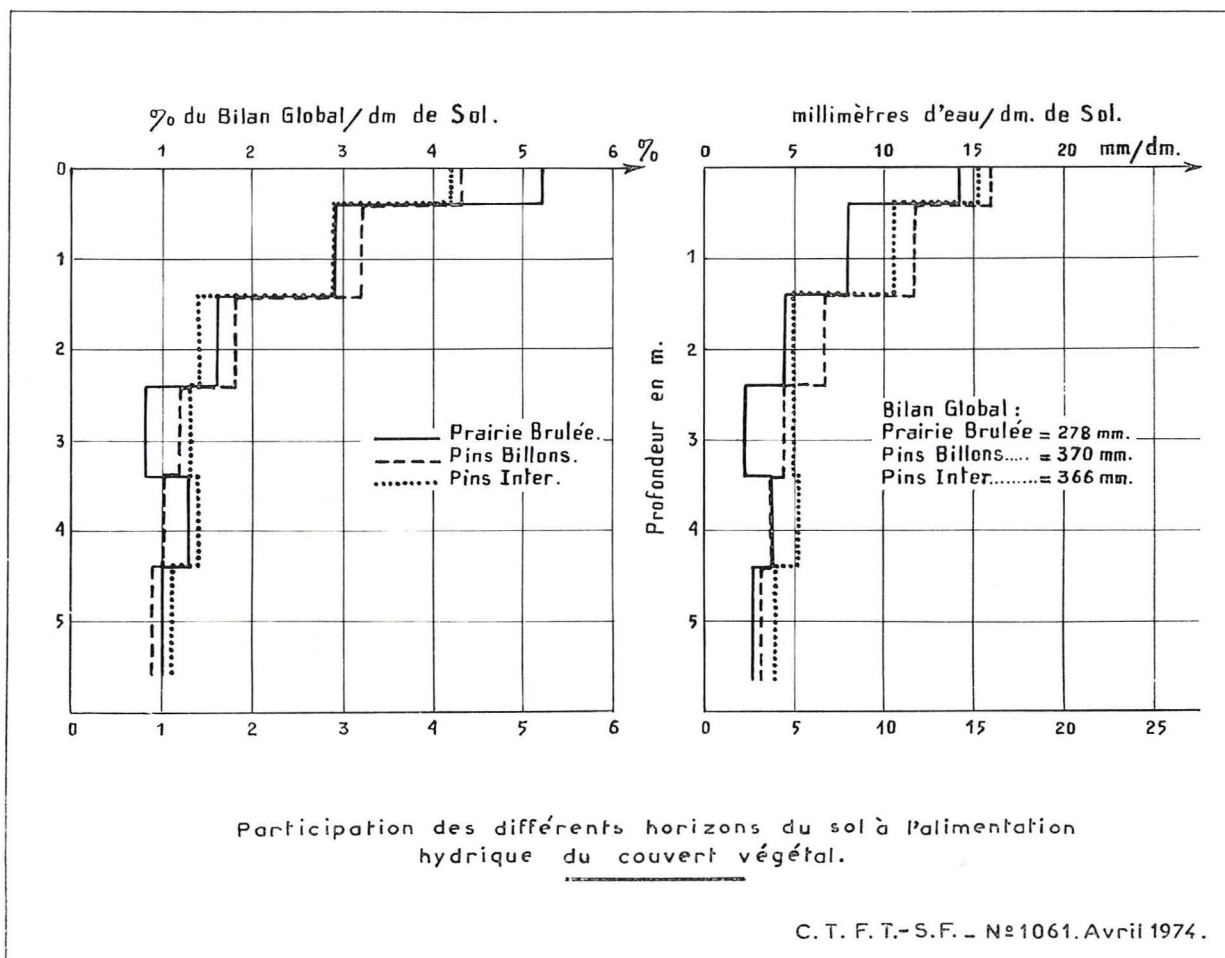
— partie gauche (A), en fonction de la profondeur, la participation de chaque couche de 10 cm de sol en % du bilan hydrique total. On note que les valeurs les plus fortes sont obtenues en surface où les 40 premiers centimètres contribuent en moyenne à 20 % du bilan global. Au-dessous de 40 cm, la participation relative de chaque horizon est très semblable sur les 3 tubes.

— partie droite (B), en fonction de la profondeur, l'utilisation du stock d'eau exprimée en mm par décimètre de sol. On remarque encore une utilisation accrue des réserves superficielles au niveau du billon. En dessous de 3,40 m, la participation des différents horizons reste approximativement constante, les différences observées entre tubes, peuvent provenir d'une hétérogénéité du sol ou d'un défaut d'implantation du tubage au niveau considéré.

Le tube n° 1 (prairie brûlée) étant pris ici comme témoin, l'étude comparative des besoins hydriques observés sur T2 et T3 permet de définir, par horizon, le développement racinaire des Pins. On remarque sur le tableau n° 47 une activité racinaire préférentielle à l'aplomb du billon jusqu'à 2,40 m bien que l'action du sous-solage ne soit appréciable que jusqu'à 40 à 50 cm au plus. Ceci avait déjà pu être remarqué lors d'étude *in situ* de l'enracinement des pins. Cette activité va s'amenuisant selon une direction verticale préférentielle jusqu'à 2,40 m environ ; ensuite c'est l'inter-billon qui semble le plus sollicité mais, à cette profondeur, la distinction n'est plus valable et nous avons fait la moyenne des 2 tubes pour définir la variation des réserves (voir fig. 68). Le déficit hydrique moyen engendré par le reboisement par rapport à la Prairie brûlée est de l'ordre de 85 mm dont 67 mm entre 0 et 3,40 m.

TABLEAU N° 47. — AMPLITUDE MOYENNE DES VARIATIONS DES RÉSERVES DU SOL SOUS PRAIRIE BRÛLÉE ET SOUS PINS

Horizon		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Total
Tube		0-40	40-140	140-240	240-340	340-440	440-560	0-560
N° 1 Prairie Brûlée	Amplitude (mm) .	57	83	44	23	37	34	278
	mm/dm . . . . .	14,3	8,1	4,4	2,3	3,7	2,8	—
	% du Total/dm . .	5,2	2,9	1,6	0,8	1,3	1,0	100
N° 2 Pins Billon	Amplitude (mm) .	64	118	67	44	38	39	370
	mm/dm . . . . .	16,0	11,8	6,7	4,4	3,8	3,3	—
	% du Total/dm . .	4,3	3,2	1,8	1,2	1,0	0,9	100
N° 3 Pins Inter.	Amplitude (mm) .	61	105	50	49	52	49	366
	mm/dm . . . . .	15,3	10,5	5,0	4,9	5,2	4,1	—
	% du Total/dm . .	4,2	2,9	1,4	1,3	1,4	1,1	—
Différences Pins-Prairie :								
Bil. (2) — (1) (mm) . . . . .		+ 7	+ 25	+ 23	+ 21	+ 1	+ 5	+ 82
Inter. (3) — (1) (mm) . . . . .		+ 4	+ 22	+ 6	+ 26	+ 15	+ 15	+ 88
Moyenne (mm) . . . . .		+ 6	+ 23	+ 15	+ 23	+ 8	+ 10	+ 85



A

B

FIG. 67.

PRAIRIE NATURELLE ET ARTIFICIELLE (Cultures).

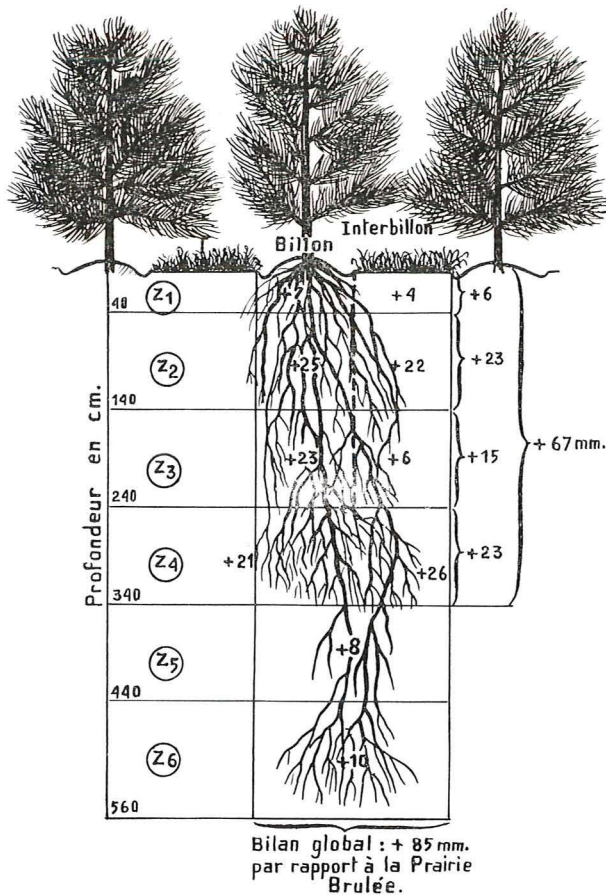
Les résultats obtenus sur le bassin des cultures et la prairie naturelle témoin sont récapitulés

dans le tableau n° 48 qui donne, en fonction de la profondeur, les variations moyennes du stock d'eau du sol.

TABLEAU N° 48. — VARIATION MOYENNE DES RÉSERVES SUR BASSINS VERSANTS DES CULTURES ET DE LA PRAIRIE TÉMOIN (en mm)

Tube n°	Couvert végétal	Horizon Année	Z1 0-45		Z2 45-95		Z3 95-145		Z4 145-195		Z5 195-265		Total 0-265	
			1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>
5 Bas	<i>Melinis</i>	1 <sup>re</sup> 2 <sup>e</sup>	85 66	50 46	50 32	31 14	27 14	231 172						
6 Bas	Jachère (Maïs) <i>Brachiaria</i>	1 <sup>re</sup> 2 <sup>e</sup>	60 55	26 43	20 52	12 44	12 (20)	130 (214)						
7 Haut	Jachère (Maïs) <i>Melinis</i>	1 <sup>re</sup> 2 <sup>e</sup>	68 64	32 44	28 38	22 26	31 39	181 213						
8 Haut	<i>Melinis</i> <i>Melinis</i>	1 <sup>re</sup> 2 <sup>e</sup>	79 67	41 40	36 30	35 27	48 38	239 202						
9	Prairie Témoin	1 <sup>re</sup> 2 <sup>e</sup>	68 44	43 33	30 25	20 12	26 15	187 129						

FIG. 68. — Détermination du profil racinaire du *Pinus patula* de 6-7 ans.



Comme, pour les tubes 6 et 7, la couverture végétale n'était pas la même au cours des deux campagnes d'expérimentation, nous avons différencié sur ce tableau deux années de végétation :

— 1<sup>re</sup> année : qui va en gros de mars 1968 à mars 1969,

— 2<sup>e</sup> année : qui va d'avril 1969 à janvier 1970, et nous avons fait pour chaque année la moyenne des amplitudes maximales atteintes au cours du dessèchement et de la réhumectation des horizons.

Nous voyons que, sur la Prairie Témoin (T9) et sur les parcelles en *Melinis* (T5 et 8) durant les deux campagnes, l'amplitude des variations est assez différente d'une année à l'autre, ce qui nous interdit de comparer les deux années entre elles sur les autres parcelles.

En considérant que, sur les parcelles des tubes 6 et 7 (en Maïs), la première saison sèche et la réhumectation qui suit sont représentatives d'un sol nu, nous pourrions, au cours de cette 1<sup>re</sup> année, comparer respectivement les parcelles situées dans le haut et celles situées dans le bas du bassin. Les différences nous donneront une idée du développement racinaire du *Melinis* suivant sa situation dans le bassin. Ces valeurs sont reprises dans la figure n° 69 suivant le mode de représentation de la

figure n° 68. Les conditions d'alimentation hydrique du haut du bassin semblent plus difficiles et il en résulte un développement racinaire plus profond que dans le bas.

En deuxième année, nous n'avons plus de « jachère » pour comparer les variations des réserves mais l'observation des résultats obtenus sous *Melinis* près des tubes 7 et 8 nous montre que les différences sont très faibles entre les deux parcelles (voir tableau 48). Dans le bas du bassin, la variation des réserves sous *Brachiaria* (T6) semble à première vue plus forte que sous *Melinis* (T5) mais elle est impossible à définir directement. Si nous supposons que, comme pour les tubes 7 et 8, le *Melinis* aurait donné les mêmes résultats sur les tubes 5 et 6, nous pouvons estimer ces variations des réserves par différence. C'est ainsi qu'a été établi le croquis de la figure n° 69 qui nous montre une consommation plus faible en surface pour le *Brachiaria*, mais une consommation bien plus forte en profondeur. Ce résultat demanderait à être précisé mais semble assez plausible car le *Brachiaria* reste vert durant toute la saison sèche, alors que le *Melinis* se dessèche presque complètement.

Enfin, pour la prairie témoin, nous avons comparé la moyenne des variations sous « Jachère » avec la variation du tube 9 au cours de la première campagne. Ceci nous montre que la consommation des réserves sous prairie est très faible et se situe surtout dans l'horizon Z2 (45-95 cm). Le bilan global s'élève à peine à 32 mm. La comparaison des amplitudes moyennes obtenues sur les 5 saisons et dans les horizons de surface (0-240) du tube n° 1 et du tube 9 nous donne les résultats suivants :

TABLEAU N° 49

	Tube 1	Tube 9
Horizon 0-40 ....	53	55
Horizon 40-140 ....	73	71 (40 + 31)
Horizon 140-240 ....	42	45 (19 + 26)
Total .....	168 mm	171 mm

Nous voyons que la consommation des réserves est du même ordre sous les deux types de prairie, la différence d'E. T. R. de 120 mm environ (voir tableau n° 46) est donc alimentée directement par la pluviométrie : 90 mm sur le ruissellement de surface et 30 mm sur la percolation.

#### Conclusion.

Le contrôle neutronique de l'humidité des sols a été poursuivi jusqu'à 5,60 m de profondeur pen-

Détermination du profil racinaire de prairies naturelles ou artificielles .

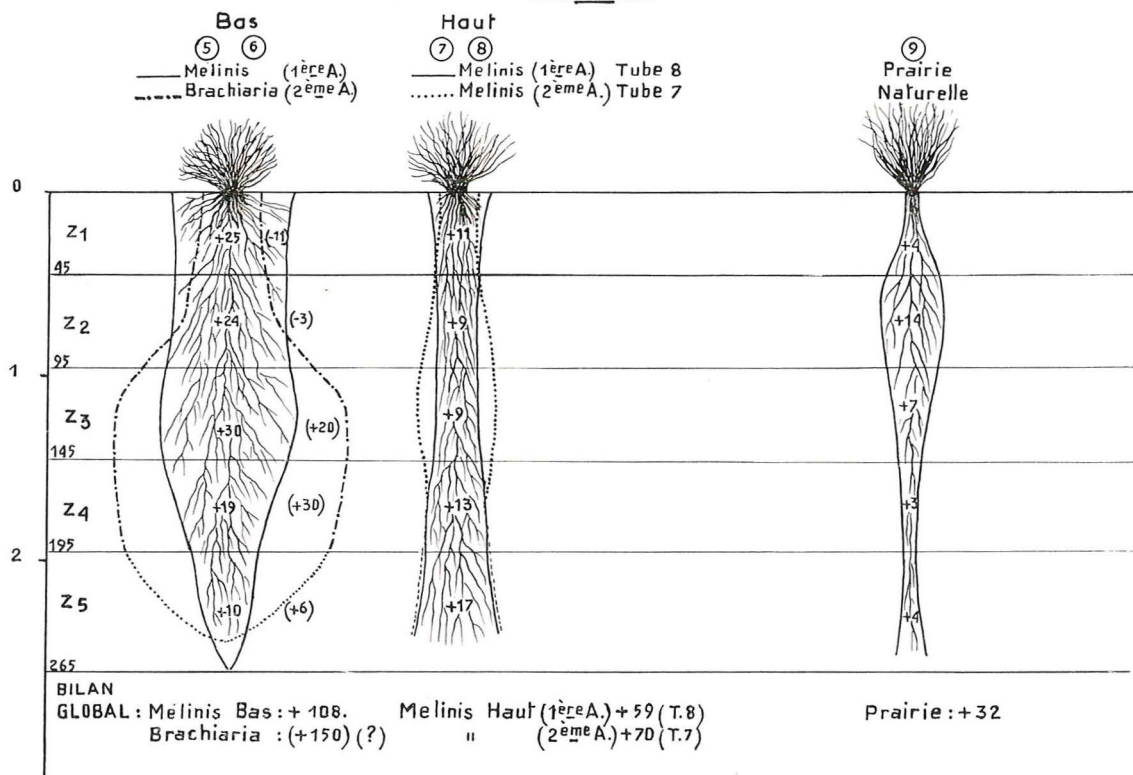


FIG. 69.

dant plus de cinq années consécutives sur les quatre bassins versants expérimentaux de Manankazo. Les mesures ont permis de déterminer au cours du temps l'évolution de l'humidité du sol en place suivant les différents horizons.

Les besoins hydriques des végétaux ont été déterminés, d'une part en début et fin de saison des pluies, d'autre part, en saison sèche. Il résulte du reboisement, un déficit hydrique annuel de 300 mm environ par rapport au terrain de prairie brûlée que la suppression du ruissellement de surface et la réduction aux deux tiers des pertes par percolation, compensent largement.

De plus, l'étude comparative de l'amplitude des variations du stock d'eau observé sous différents couverts végétaux, et sous prairie brûlée ou sol nu, a permis de préciser l'enveloppe racinaire des jeunes *Pinus patula* de 6-7 ans, de la prairie artificielle de *Melinis* et de *Brachiaria* et de la prairie naturelle. Sous Pins, la succion racinaire est importante à l'aplomb du billon et se fait sentir jusqu'à

3,40 m de profondeur. Le *Melinis* dispose aussi d'un système racinaire puissant, d'autant plus profond que son site d'accueil se trouve plus haut dans le bassin versant étudié. Le *Brachiaria* semble disposer d'un système racinaire très développé et très actif entre 1 et 2 m de profondeur mais les observations ne portant que sur une seule campagne, il serait utile de préciser ce point.

Ces premiers résultats ont montré tout l'intérêt de cette méthode. Aussi, grâce au financement de la D. G. R. S. T., dans le cadre du projet 3 du programme M. A. B., l'expérimentation a été tout particulièrement renforcée : 4 tubes ont été installés sur les bassins 1, 3 et 4 et 6 sur le bassin n° 2 des cultures. La fréquence des mesures est fixée à tous les 15 jours en saison sèche et en saison des pluies et toutes les semaines au début de la saison des pluies et en début de saison sèche.

D'autre part, l'installation de lysimètres simplifiés, type Roose, permettra de préciser la percolation.

INFLUENCE DU COUVERT SUR LES PERTES EN TERRE (fig. n° 70).

Pertes en éléments lourds.

On obtient les résultats suivants :

TABLEAU N° 50

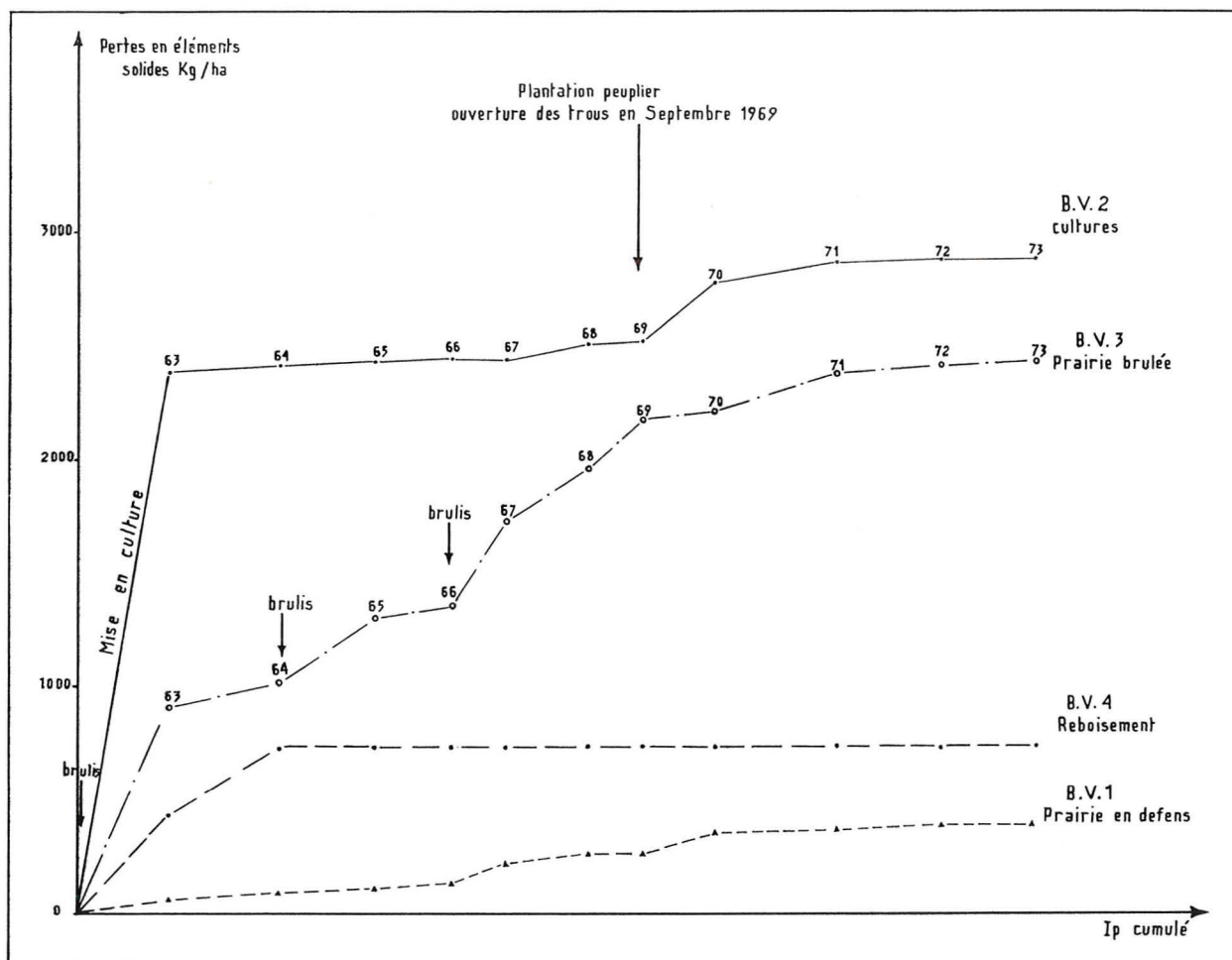
Campagne	B. V. 1 Prairie en défens	B. V. 2 Cultures	B. V. 3 Prairie brûlée	B. V. 4 Reboisement
* 1962/63	11	2 350	680	310
1963/64	5	6	88	12
* 1964/65	0	0	147	0
1965/66	0	0	16	0
* 1966/67	0	0	270	0
1967/68	0	0	191	0
1968/69	0	0	17	0
1969/70	0	0	9	0
** 1970/71	0	6	0	0
1971/72	0	0	6	0
1972/73	0	0	0	0

\* Années de mise à feu sur le B. V. 3  
\*\* Plantation peupliers sur le B. V. 2

• Sur le bassin mis en défens, les pertes en éléments lourds, faibles les deux premières années, sont devenues nulles par la suite dès la reconstitution de la couverture végétale. On peut donc dire que la prairie naturelle en équilibre ne subit pas d'érosion.

• Il en est tout autrement dès que l'on met à feu la prairie. Les pertes en éléments lourds augmentent à chaque mise à feu. Par contre dès qu'on laisse le bassin en défens les pertes diminuent régulièrement pour devenir au bout de quatre ans nulles, confir-

FIG. 70. — Pertes en éléments solides : suspensions et pertes en terre en kg/ha à Manankazo.



Manankazo. Etude des suspensions, crue du 9 février 1968.  
Suspensions du B. V. 2 des cultures.

mant la protection opérée par la mise en défens.

• La mise en culture occasionne la première année des départs importants (plus de 2 t/ha) mais la deuxième année, ils deviennent très faibles et sont nuls par la suite. On enregistre une légère érosion en 1970-71, année suivant la plantation des peupliers dans le bas du bassin.

Enfin notons le peu d'érosion causé par le travail du sol l'année d'aménagement du bassin des pins. La troisième année les pertes deviennent nulles.

#### Pertes en suspensions.

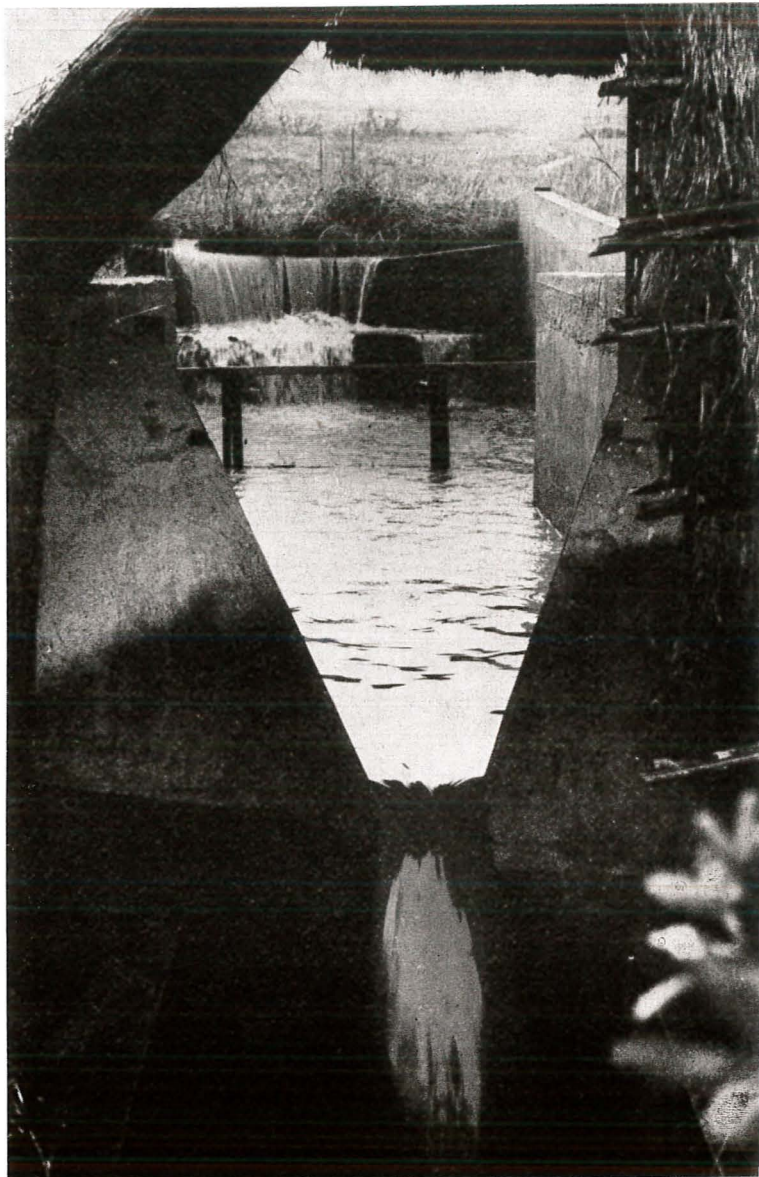
L'estimation des pertes en suspensions, à partir des prélèvements au début, à la pointe et à la fin de la crue, a donné les résultats approchés indiqués dans le tableau n° 51.

On peut, au-delà des quelques irrégularités dues à l'estimation, tirer des conclusions :

— La mise à feu augmente nettement les suspensions ; la courbe cumulée de l'ensemble des pertes sur ce bassin illustre de façon indiscutable l'effet érosif du brûlis et permet d'observer la lente (six ans) remise en équilibre du bassin.

— Les eaux ruissellent du bassin des cultures chargées de suspensions. Pourtant le bilan global des pertes en éléments fins est faible, cela tient au fait que la quantité ruisselée y est peu importante et donc l'érosion sous cette forme n'est pas très élevée.

— Le bassin reboisé subit des pertes en suspensions négligeables.



#### POURSUITE ET AMÉLIORATION DE L'EX-PÉRIMENTATION. CONCLUSION.

En 1972, compte tenu des résultats déjà obtenus, et reprenant des demandes faites par la Direction

des Eaux et Forêts, un projet d'action concertée «Equilibre et lutte écologique» a retenu l'attention de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique et a pu faire l'objet d'une aide à la Recherche. Ce projet d'action concertée s'inscrit

TABLEAU N° 51. — PERTES EN SUSPENSIONS (en kg/ha)

Campagne	B. V. 1 Prairie en défens	B. V. 2 Cultures	B. V. 3 Prairie brûlée	B. V. 4 Reboisement
* 1962/63	47	41	<b>230</b>	120
1963/64	24	23	27	284
* 1964/65	26	24	135	5
1965/66	13	4	33	1
* 1966/67	113	—	109	—
1967/68	20	60	40	—
1968/69	6	24	202	3
** 1969/70	98	251	27	2
1970/71	4	96	167	1
1971/72	32	61	34	0
1972/73	8	38	39	5

\* Années de mise à feu sur le B. V. 3  
\*\* Plantation peupliers sur B. V. 2



dans le cadre du projet n° 3. MAB (l'Homme et la biosphère) du programme U. N. E. S. C. O. Il est mené en liaison avec le Service des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols, par les divers Instituts de recherche appliquée C. T. F. T.-I. R. A. T.-I. E. M. V. T. et l'O. R. S. T. O. M. Une partie des recherches est réalisée à Manankazo, selon un programme qui prévoit la poursuite des expérimentations déjà en place avec renforcement des actions sur les points ci-après :

- étude de la variation du taux d'humidité du sol selon les divers couverts ;
- étude du drainage vertical (lysimètre simplifié) ;
- étude de l'évolution du profil cultural en fonction des traitements et étude de ses relations avec le bilan de l'eau ;
- étude de l'évapotranspiration ;
- étude de l'évolution naturelle de la végétation herbacée ;
- mise en place de parcelles élémentaires pour étude de l'évolution tant du point de vue sol et ruissellement que composition floristique.

Certains résultats sont déjà acquis, en particulier l'importance de l'action de l'homme sur l'érosion et le ruissellement par les modifications qu'elle entraîne sur la couverture végétale. L'impact de la mise à feu sur le ruissellement est considérable ; la fraction ruisselée lors d'une crue passe de 60 % au maximum sur la prairie naturelle à 74 % pour la prairie brûlée. Le débit de pointe y est particulièrement élevé 270 l/s/ha au lieu de 146 l/s/ha sur le bassin en défens.

L'aménagement du bassin en cultures isohypses permet une meilleure infiltration et améliore la structure du sol. Le ruissellement y est beaucoup plus faible et ne représente que 2,5 % des précipitations.

Quant à l'action du reboisement elle est tout à fait remarquable ; les pointes observées trois années après la mise en place sont au maximum de 80 l/s/ha, l'effet travail du sol jouant un rôle important.

Au point de vue érosion, la prairie naturelle de reconstitution ne perd plus d'éléments lourds et l'essentiel des départs, dont le total reste peu élevé, consiste alors en des pertes en suspensions 36 kg/ha et par an en moyenne.

Dès la mise à feu, l'érosion devient forte, à la fois en éléments lourds et en éléments fins, pour diminuer peu à peu lors de la mise en défens.

L'effet destructeur de ces mises à feu successives apparaît encore plus évident sur la végétation dont les touffes deviennent après le troisième brûlis si

clairsemées que le brûlis n'y est plus possible pendant plusieurs années de suite.

La mise en culture provoque la première année un départ important d'éléments lourds (2,4 t/ha) c'est pourquoi il est nécessaire de ne travailler au départ qu'une courbe sur deux de l'aménagement et dans la mesure du possible de réaliser l'alternance des courbes. Les suspensions y sont, en pourcentage, assez importantes mais du fait d'un ruissellement assez peu élevé, la quantité annuelle y est assez faible 57 kg/ha, soit nettement moins que la valeur observée sur le bassin en prairie brûlée.

Le reboisement occasionne une faible érosion, les deux premières années (0,3 t/ha la première année ; 0,01 la seconde). Elle devient nulle par la suite et s'avère de loin le meilleur traitement conservatoire possible.

Nous pouvons donc dire :

— que la mise en culture rationnelle des terres à vocation agricole se présente comme l'un des moyens les plus sûrs de réduire les méfaits du ruissellement dans le cadre de l'aménagement des bassins versants.

— que la pratique des feux trop souvent répétés a une influence extrêmement importante sur les phénomènes de ruissellement ainsi que sur les pertes en éléments lourds et suspensions alors que la mise en défens permet d'arrêter tout départ de terre mais laisse exister un ruissellement important. Le reboisement a une action remarquable, tout spécialement sur les pointes de ruissellement, dès le départ. Cet effet est surtout dû au travail du sol.

Il découle naturellement de ces éléments des règles à appliquer pour l'aménagement rationnel des terres dans le cadre de la ferme ou du bassin versant. Elles consisteront essentiellement en la définition des potentialités des sols puis l'établissement d'une classification des terres en vue de leur utilisation tenant compte des différents facteurs (pentes-couvertures, nature des sols) et la définition des pratiques conservatoires simples à mettre en œuvre sur les terrains. Spécialement pour les terres destinées à être mises en culture sur des sols pauvres comme ceux des Hauts-Plateaux Malgaches, il est presque toujours indispensable de restaurer la fertilité du sol (fumure de redressement) ; les travaux de conservation permettent de maintenir en place l'eau et le sol et évitent que les engrais apportés ne soient entraînés par le ruissellement et perdus pour les cultures. L'aménagement rationnel, permettant le maintien des facteurs de production ne peut se concevoir à l'échelle de la ferme ou du bassin versant sans la création d'infrastructures anti-érosives souvent légères et l'instauration de pratiques agronomiques complémentaires conservatoires désormais classiques.

## INFLUENCE DE L'AMÉNAGEMENT DES TERRAINS DE PARCOURS DE L'ANDROY CRISTALLIN EN VUE DE L'AMÉLIORATION DES RESSOURCES EN EAU (ANTANIMORA)

TABLEAU N° 52

Campagne	Pluviométrie annuelle (mm)		Ecoulement permanent (mm)		Ecoulement des crues (mm)		Ecoulement total (mm)	
	Tsimandaha	Ianamolora	Tsimandaha	Ianamolora	Tsimandaha	Ianamolora	Tsimandaha	Ianamolora
1963-64 .....	552	567	16,64	11,03	2,67	24,95	19,31	35,98
1964-65 .....	410	403	7,13	4,14	0	6,73	7,13	10,88
1965-66 .....	648	588	3,96	3,17	1,27	30,51	5,23	33,68
1966-67 .....	805	748	46,83	18,10	14,41	88,35	61,53	106,46
1967-68 .....	702	563	38,52	7,91	2,88	36,40	41,40	44,31
Moyenne (mm) .....	623	574	22,62	8,87	4,25	37,39	26,32	46,26
% de pluie .....	100	100	3,22	1,55	0,68	6,51	3,75	8,06
% du débit total d'Ianamolora .....	—	—	49	19	9	81	57	100

Ces résultats ont déjà fait l'objet d'une publication dans la revue « **Bois et Forêts des Tropiques** », n° 136, mars-avril 1971, (1) en ce qui concerne les 5 premières campagnes. Une 6<sup>e</sup> campagne (1967-68) de mesure est venue confirmer les conclusions déjà tirées alors, ce qui nous a amenés à reprendre (souvent textuellement) les termes de cette première note en y ajoutant simplement le cas échéant les résultats de cette dernière campagne.

### EFFETS DE L'AMÉNAGEMENT SUR LE RUISSELLEMENT GLOBAL (fig. n° 71).

Le bilan comparatif global de l'eau tombée sur les deux bassins met en évidence l'influence de l'aménagement.

Ce bilan a été calculé mensuellement pour les cinq dernières campagnes (2) et nous en avons fait la récapitulation dans le tableau n° 52 ci-dessus en faisant apparaître les débits annuels en mm (lame d'eau équivalente),

(1) Etude de l'économie de l'eau à Antanimora (Sud de Madagascar) par MM. BENOIT DE COGNAC, BAILLY, DE VERGNETTE, MALVOS et HUEBER.

(2) Lors de la campagne 1962-63, les débits d'étiage n'ont pas été mesurés.

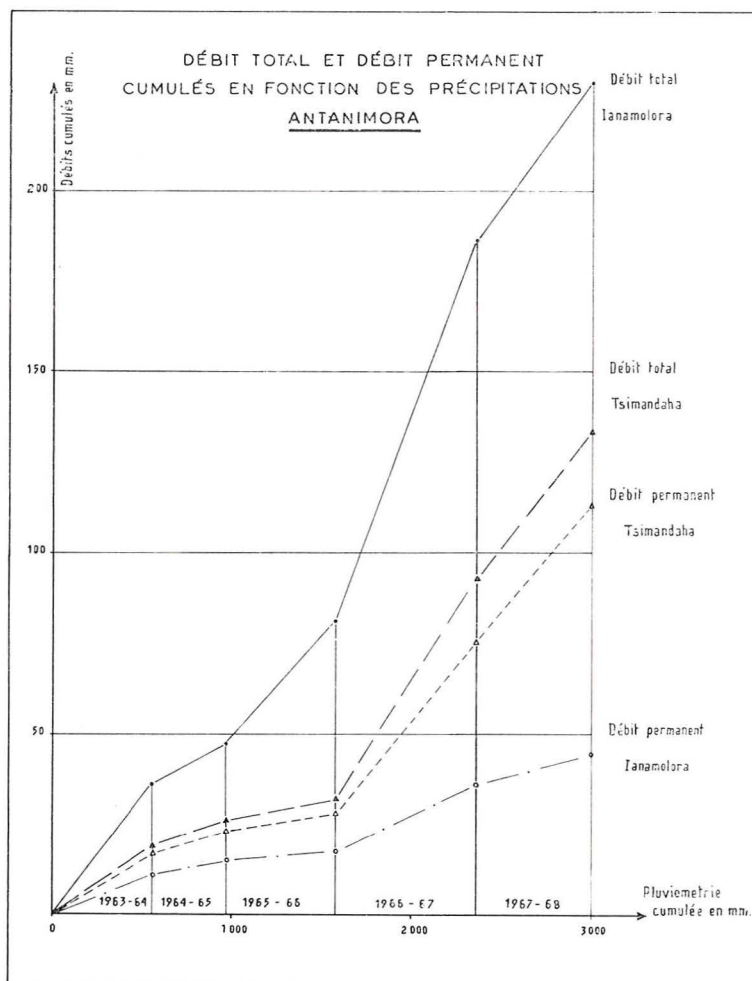


FIG. 71.

ainsi que le débit moyen annuel en mm d'eau écoulée pour 100 mm de pluie tombée, afin d'éliminer autant que possible les variations dues aux différences de pluviométrie sur les deux bassins.

L'avant-dernière ligne de ce tableau (% de pluie) nous montre que pour 100 mm de pluie tombée en moyenne sur chacun des bassins versants, 8,06 mm s'écoulent à Ianamolora (1). Ceci nous permet de dire que le déficit d'écoulement moyen annuel dans cette région est donc en moyenne supérieur à 90 % de la pluviométrie, ce qui est considérable.

Par contre, il ne s'écoule que 3,75 mm à Tsimandaha (2); cela signifie que la différence, soit 4,31 mm, est utilisée (infiltration évapotranspiration) en plus, sur ce bassin aménagé. Le déficit d'écoulement est

alors, en moyenne de plus de 95 % de la pluviométrie.

Cependant, on voit que sur les 8,06 mm qui s'écoulent à Ianamolora, 6,51 mm soit 80 % du débit total de ce bassin, passent sous forme de crues et qu'il faudrait construire de gros ouvrages pour accumuler ce volume d'eau et le rendre utilisable. Il ne reste donc que 20 % environ qui passent sous forme de petits débits et qui sont utilisables sans ouvrage spécial.

On a donc sur le bassin aménagé, non seulement une meilleure utilisation de l'eau de pluie sur le bassin lui-même (recharge de la nappe, utilisation par la végétation), mais de plus, les petits débits permettent de récupérer sans ouvrage important, et tout au long de la saison sèche, une part appréciable de l'eau infiltrée.

#### EFFET DE L'AMÉNAGEMENT SUR LA NATURE DU RUISSELLEMENT (tableau n° 54).

- (1) Bassin de Ianamolora non aménagé  
(2) Bassin de Tsimandaha aménagé

TABLEAU N° 53

Bassin versant	Maximums annuels du débit de pointe l/s/ha					
	1962/63	1963/64	1964/65	1965/66	1966/67	1967/68
Ianamolora . . . . .	130 *	37	11	91	114	35
Tsimandaha . . . . .	60	1	faible	faible	12	1

\* Estimation

TABLEAU N° 54

Campagne	Bassin versant	Nombre de ruissellements supérieurs à % de la Pluviométrie					Pointes de ruissellement : supérieures à l/s/ha				
		Total (1)	1 %	5 %	10 %	20 %	50 %	2 l/s	10 l/s	50 l/s	100 l/s
1962/63 (2)	Ianamolora . . . . .	9	9	9	8	7	0	9	7	3	0
	Tsimandaha . . . . .	—	8	4	2	2	0	4	2	1	0
1963/64	Ianamolora . . . . .	9	9	5	4	0	0	6	4	0	0
	Tsimandaha . . . . .	—	2	0	0	0	0	0	0	0	0
1964/65	Ianamolora . . . . .	8	8	1	0	0	0	3	1	0	0
	Tsimandaha . . . . .	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1965/66	Ianamolora . . . . .	9	9	6	3	3	0	7	4	2	0
	Tsimandaha . . . . .	—	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1966/67	Ianamolora . . . . .	20	20	13	10	6	1	14	9	3	2
	Tsimandaha . . . . .	—	9	4	1	0	0	3	1	0	0
1967/68	Ianamolora . . . . .	8	8	6	5	2	0	6	5	0	0
	Tsimandaha . . . . .	—	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Total des 6 campagnes	Ianamolora . . . . .	63	63	40	30	18	1	45	30	8	2
	% du total . . . . .	—	100	67	48	29	2	71	48	13	3
	Tsimandaha . . . . .	—	22	8	3	2	0	7	3	1	0
	% du total . . . . .	—	35	13	5	3	0	11	5	2	0

(1) Le total des ruissellements est arbitrairement le total des ruissellements > 1 % sur le bassin de Ianamolora.  
(2) Les enregistrements n'ayant commencé que le 24.1.63 sur Ianamolora, la campagne 1962/63 a été tronquée de toute la période antérieure à cette date pour les deux bassins.

De haut en bas :

FIG. 72. — Crues classées en fonction du coefficient de ruissellement, en %, à Antanimora

FIG. 73. — Crues classées et cumulées en fonction de la lame d'eau ruisselée à Antanimora.

On a arbitrairement compté comme « crues » les ruissellements ayant provoqué sur l'un des bassins (en général Ianamolora) un écoulement supérieur à 1 % de la pluviométrie pondérée sur ce bassin.

**Classement en fonction du coefficient de ruissellement**  
(fig. n° 72).

Sur ces six campagnes, seule l'avant-dernière a présenté un nombre de ruissellements intéressant et montre d'une façon évidente l'effet incontestable des aménagements du bassin de Tsimandaha. Lors de cette campagne (1966-67) le ruissellement maximum obtenu sur le bassin est de l'ordre de 10 % de la pluie correspondante alors que sur Ianamolora, on a atteint par trois fois des ruissellements supérieurs à 30 %. Le total des 6 campagnes est indiqué dans le tableau n° 55.

Ce tableau nous montre que durant ces 6 années, nous avons enregistré sur Ianamolora 63 ruissellements supérieurs à 1 %, alors que 22 seulement ont été enregistrés sur Tsimandaha (soit à peine plus du tiers).

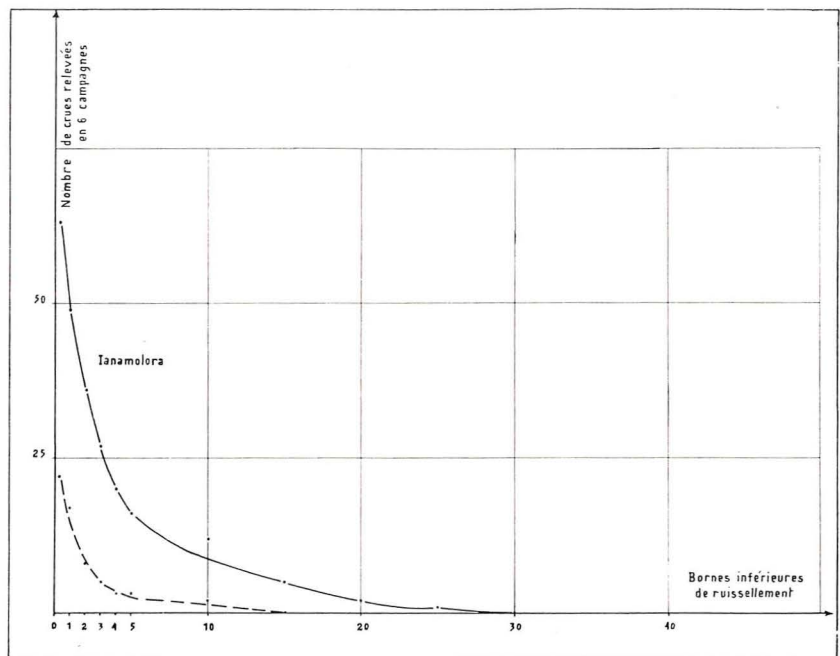
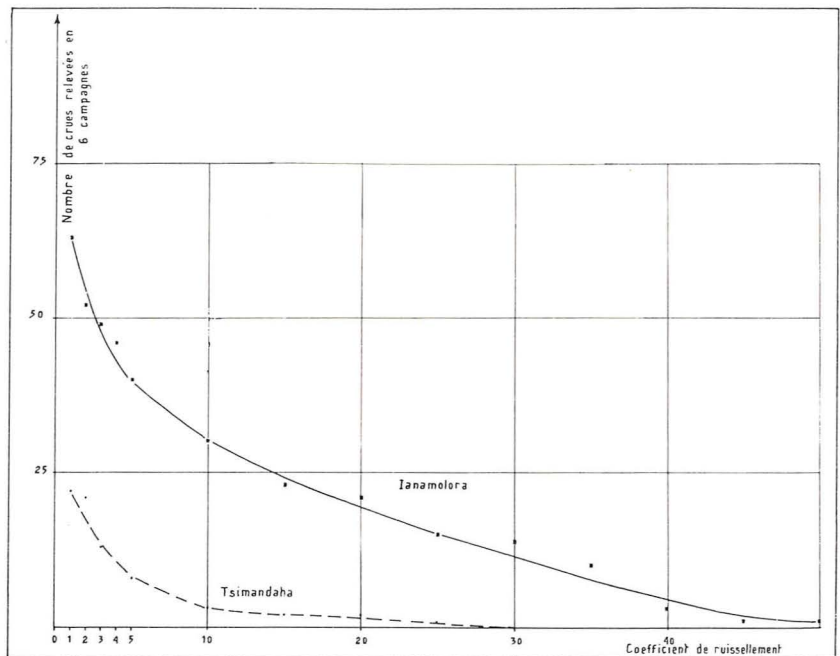


TABLEAU N° 55

Bassin versant	Nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 %	20 %	10 %	5 %	1 %
Ianamolora ...	1	18	30	40	63
Tsimandaha ..	0	2	3	8	22

**Classement en fonction de la lame d'eau ruisselée**  
(en mm) (fig. n° 73).

Le tableau ci-après reprend, pour quelques valeurs caractéristiques, le pourcentage du nombre de crues ayant atteint un certain volume observé, par rapport au nombre total enregistré sur le bassin de Ianamolora durant les 6 campagnes :

Fig. 74.

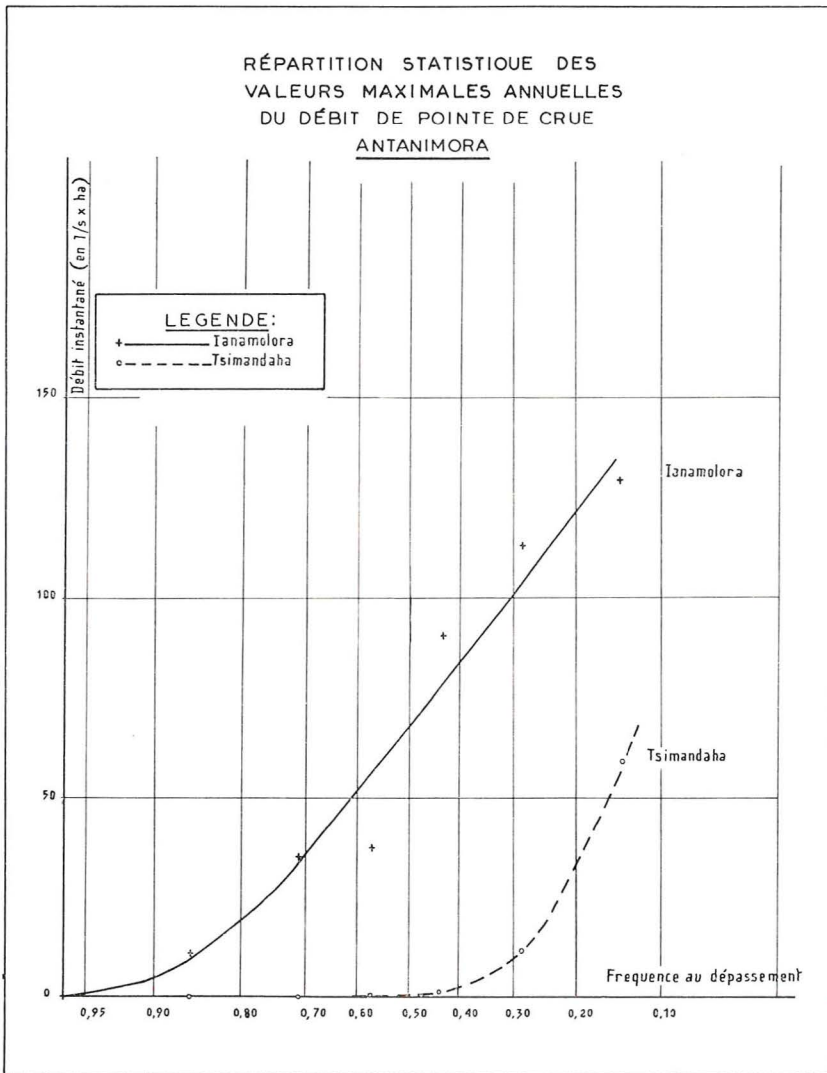


TABLEAU N° 56

Bassin versant	% du nombre de ruissellements supérieurs à				
	50 mm	20 mm	10 mm	5 mm	1 mm
Ianamolora	0	3 %	19 %	25 %	78 %
Tsimandaha	0	0	3 %	5 %	27 %

Ce qui confirme l'effet des aménagements sur la diminution des forts ruissellements.

**Valeurs maximales annuelles des débits de pointe de crue** (fig. n° 74 et tableau n° 53).

On constate :

— que le maximum absolu sur Ianamolora est au moins le double de celui observé à Tsimandaha ; en

1966/67 il est multiplié par 10 ce qui est remarquable,

— qu'une année sur deux (fréquence de 0,50) le débit de pointe est d'environ 70 l/s/ha sur Ianamolora, il n'est plus que de 1 l/s/ha sur Tsimandaha.

**ÉTUDE DU DÉBIT D'ÉTIAGE.**

**Bilan global.**

Les mesures des écoulements permanents (petits débits hors crues) ont été effectuées depuis janvier 1963 sur les deux bassins. Sur Ianamolora, on a même effectué deux mesures :

— l'une sur un petit déversoir situé en amont du piège à sable ;

— l'autre sur le grand déversoir en V, après le piège à sable, afin de déterminer l'effet du piège à sable sur ces petits débits.

La comparaison de ces deux mesures sur les trois campagnes 1964 à 1967, nous montre d'ailleurs que les débits du petit déversoir sont, en général, plus

forts que ceux du grand déversoir. Ceci est normal puisque les pertes dues au piège à sable (évaporation-infiltration) ne sont pas compensées en ce qui concerne ces petits débits par la légère augmentation de surface du bassin versant.

Sur la figure n° 75 on a reporté les débits de saison sèche des trois déversoirs en mm et par mois pour les 5 saisons sèches 1963 à 1967 ainsi que la pluviométrie mensuelle sur les deux bassins.

Le tableau n° 57 récapitule les totaux annuels des petits débits de saison sèche (mois d'avril à novembre) pour les 5 années de 1963 à 1967.

Sur le graphique, on voit que, d'une façon générale, les petits débits varient avec la quantité de pluie tombée lors de la saison des pluies précédente et qu'ils sont toujours plus importants sur Tsimandaha que sur Ianamolora (petit déversoir). Seule la saison sèche 1965 amène ces débits à s'égaliser à une valeur très faible et ceci peut s'expliquer en considérant qu'après une année assez défici-

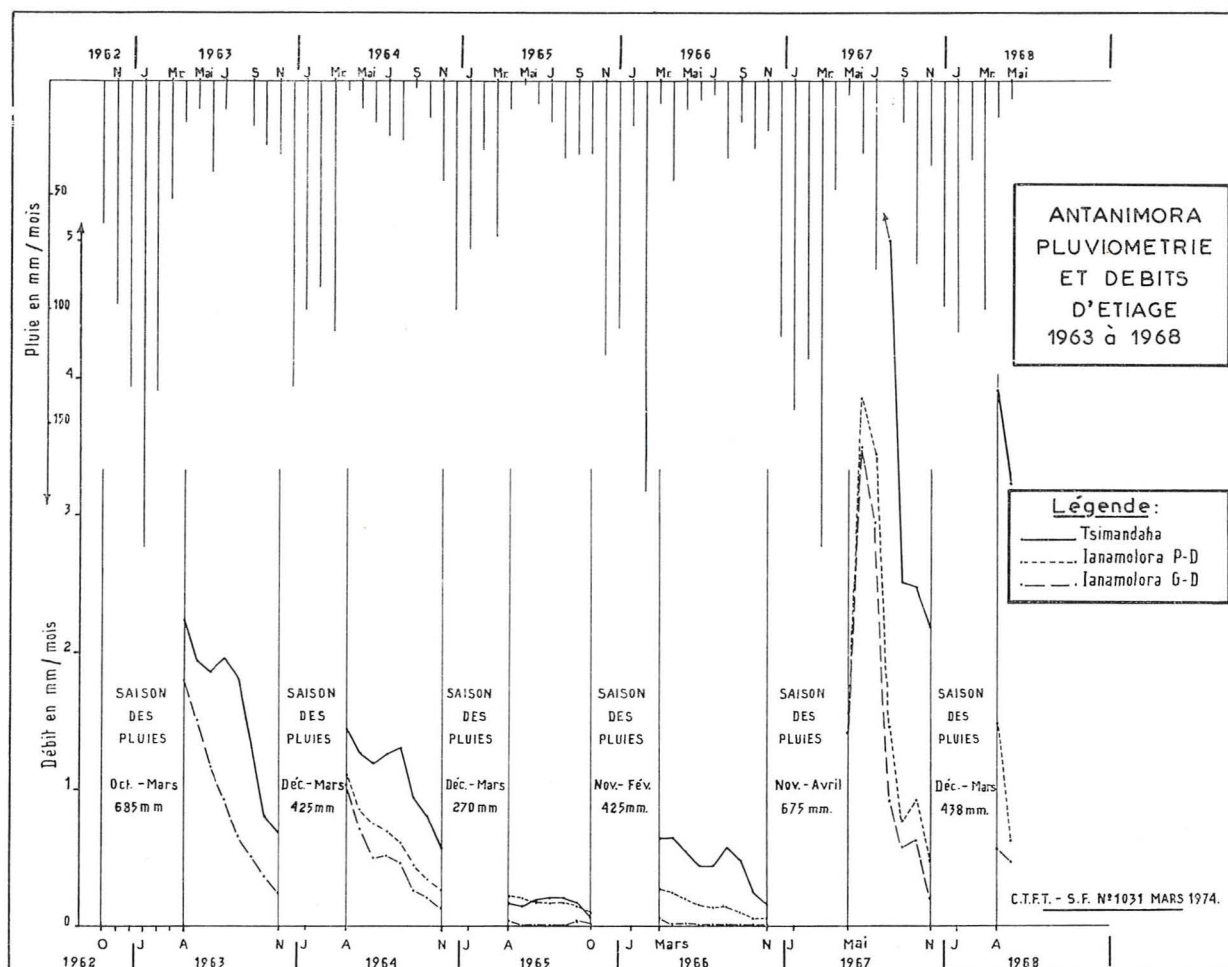


FIG. 75.

TABLEAU N° 57  
PETITS DÉBITS DE SAISON SÈCHE (en mm)

Année	Tsimandaha	* Ianamolora
1963 .....	12,6	7,3
1964 .....	8,7	5,0
1965 .....	1,4	1,3
1966 .....	3,4	1,0
1967 .....	44,3	16,2
Total .....	70,4	30,8
Moyenne pour 8 mois de saison sèche/an.....	14,1 mm (100 %)	6,2 mm (43,8 %)

(\* ) Débit jaugeé au grand déversoir en 1963 et au petit déversoir ensuite.

taire en pluie, les réserves de la nappe phréatique s'épuisent d'autant plus vite sur Tsimandaha que le thalweg de ce bassin est beaucoup plus cultivé et compte beaucoup plus d'arbres que celui d'Iana-

molora. Il est certain que cette végétation, impossible à éliminer, fausse, d'une façon difficilement chiffrable, les résultats en saison particulièrement déficitaire.

Pour les autres années, il est indéniable que l'effet des traitements sur Tsimandaha augmente d'une façon notable les petits débits utilisables en saison sèche. En moyenne sur quatre années, ces débits sont près de deux fois plus importants sur Tsimandaha que sur Ianamolora.

#### Etude des variations journalières.

Depuis mai 1964, on a effectué les mesures de débit d'étiage deux fois par jour chaque fois que cela était possible (hors-crue). On s'est alors aperçu que, d'une façon assez générale, le débit du matin (7 h) était plus élevé que le débit du soir (17 h). Ces fluctuations qui peuvent dépasser 0,20 l/s pour des débits compris entre 0,5 à 1 l/s, semblent dues à l'évapotranspiration de la végétation le long des rives.

Elles sont, en général, d'autant plus importantes que :

- le débit permanent moyen est plus élevé,
- l'on se trouve en saison de végétation,
- la température moyenne et l'évaporation (PICHE) sont plus élevées.

Le thalweg du bassin de Tsimandaha étant beaucoup plus boisé (manguiers) et cultivé que celui d'Ianamolora, cette variation y est beaucoup plus importante en amplitude.

#### Pertes en suspensions au cours des deux dernières campagnes.

La moyenne pondérée de la quantité des pertes en suspensions a été calculée en donnant à chacune des valeurs (début, pointe, décrue) le « poids » du volume d'eau passé au déversoir pendant le temps encadrant l'heure du prélèvement. Quand les mesures de suspensions sont assez semblables au cours de la crue, on a simplement fait une moyenne arithmétique.

Enfin, pour les crues n'ayant pas fait l'objet de prélèvements ou dont les prélèvements se sont perdus (campagne 1965-66) on a estimé la suspension suivant les résultats des crues voisines et du même ordre de grandeur en volume. Pour les crues de faible importance, cette valeur n'a que très peu d'influence sur le total et peut être estimée de façon approximative sans grand risque d'erreur. Pour les autres crues, le risque d'erreur est important et nous en tiendrons compte dans nos extrapolations.

Les résultats obtenus sur deux campagnes sont les suivants (résultats arrondis) :

TABLEAU N° 58

Campagnes	Perte en suspension annuelle (t)		Rapport Tsimandaha Ianamolora
	Tsimandaha	Ianamolora	
1965/66	4	70	6 %
1966/67	10	170	6 %

Bien que les résultats de 1965/66 soient beaucoup plus sujets à caution que ceux de 1966/67, on voit que le rapport des pertes en suspensions sur les deux bassins reste très voisin de 6 %. Ceci indique une certaine cohérence des résultats et nous permet de démontrer une fois de plus, l'effet spectaculaire obtenu sur le bassin de Tsimandaha.

Si l'on compare ces résultats aux index de WISCHMEIER définis plus haut pour ces deux campagnes on voit que le rapport des index de pluie annuels moyens [Ra] sont les suivants :

$$\begin{aligned} \text{Ra1} &= 165 \text{ en } 1965-66. \\ \text{Ra2} &= 340 \text{ en } 1966-67. \\ \text{Ra1/Ra2} &= 50 \%. \end{aligned}$$

est du même ordre de grandeur que le rapport des pertes en terre sur les deux bassins (40 %).

Le Ra moyen (sur 5 campagnes) étant de 225 environ, on peut estimer que les pertes en suspensions moyennes sur les deux bassins doivent être de l'ordre de :

- Tsimandaha : 6,5 t/an soit 40 kg/ha/an.
- Ianamolora : 110 t/an soit 600 kg/ha/an.

#### Pertes en terre totales.

Il ne s'agissait jusqu'ici que de la terre perdue en suspension dans les eaux de crue. Pour Ianamolora, il faudrait y ajouter les éléments lourds accumulés dans le piège à sable situé juste en amont du déversoir et qui auraient été perdus sans ce barrage.

*Manankazo. Etude des suspensions. Crue du 9 février 1968. Suspensions du B. V. 3 : prairie brûlée.*



Au cours des trois dernières campagnes, le volume de sable récupéré peut être estimé à environ 2.000 m<sup>3</sup>, soit sensiblement 3.000 t ce qui fait 1.000 t/an en moyenne et 540 t/km<sup>2</sup>/an sur ce bassin.

Ces chiffres sont, bien entendu, à utiliser avec beaucoup de prudence, car ils ne concernent qu'un petit nombre d'années et procèdent d'une extrapolation très approximative, mais ils nous donnent pour Ianamolora, un chiffre assez voisin de celui trouvé par FOURNIER pour cette zone du Sud de Madagascar soit 600 à 1.000 t/km<sup>2</sup>/an. Nous pouvons donc, sans grand risque, en déduire l'effet remarquable de l'aménagement du bassin de Tsimandaha sur la diminution de l'érosion qui devient plus de 10 fois plus faible sur ce bassin si l'on ne compare que les pertes en suspension et 100 fois plus faible pour les pertes totales.

#### Analyse des eaux de ruissellement (campagne 63/64).

Des analyses de l'eau de ruissellement recueillie au cours de quelques crues de la campagne 1963/64 ont été réalisées.

Les résultats nous montrent qu'au début de la saison des pluies les suspensions sont plus importantes à Ianamolora, où elles dépassent parfois 5 % qu'à Tsimandaha où elles restent toujours inférieures à 1 %. Les chiffres s'égalisent ensuite vers 0,4 à 0,5 % sur les deux bassins ; ceci se constate aussi au cours de la campagne 1966-67. Le taux d'éléments fins (Argile + Limon) suit le taux de suspension d'une façon assez semblable sur les deux bassins et il décroît de 70 à 50 % de la suspension totale au cours de la saison des pluies.

En ce qui concerne les éléments perdus, on remarque que, sur Tsimandaha, les eaux sont plus chargées en sels dissous, surtout en sodium et magnésium et que la conductivité électrique s'en trouve notablement augmentée ainsi que le pH. Ceci s'explique par le volume d'eau plus important passant en crue à Ianamolora d'où une dilution plus forte sur ce bassin. Cependant, malgré cette différence, nous observons une concentration en carbone, dans l'ensemble, plus faible sur Ianamolora (50 ppm au lieu de 80 en moyenne) d'où une perte moins importante en matière organique en suspension (débris végétaux, humus) qui contribue à enrichir le sol sur ce bassin.

#### CONCLUSION. EFFET GLOBAL.

Après cinq années d'expérimentation et malgré l'imprécision de certaines mesures, on a pu tirer de la comparaison de ces deux bassins, un certain nombre de chiffres qui nous ont montré l'efficacité indéniable des travaux de protection

*Manankazo. Etude des suspensions. Crue du 9 février 1968. Suspensions du B. V. 1 : prairie en défens.*

réalisés sur le bassin versant de Tsimandaha.

Cette efficacité se retrouve dans tous les domaines :

— écrêtement des pointes de crues dont le maximum enregistré passe de plus de 100 l/s/ha sur Ianamolora en 1966-67 à moins de 15 l/s/ha sur Tsimandaha durant cette même campagne ;

— meilleure utilisation de l'eau sur le bassin puisqu'on enregistre en moyenne au déversoir de Tsimandaha, moins de 50 % du débit total mesuré à celui d'Ianamolora pour une pluviométrie identique ;

— augmentation des petits débits de saison sèche qui passent du simple au double en année normale ;

— pertes en suspensions plus de dix fois inférieures et pertes en terre totales plus de 100 fois plus faibles par élimination presque complète des pertes en éléments grossiers.

L'intérêt de tels aménagements, pour améliorer les quantités d'eau mise à la disposition des hommes, des animaux et des plantes, semble considérable dans la région de l'Androy cristallin ; la multiplication de tels dispositifs devrait être envisageable.





Les expérimentations annexes mises en place à Antanimora, nous ont permis de chiffrer, grâce aux bacs à évaporation, l'avantage des pièges à sable pour la conservation de l'eau dans des conditions économiques et hygiéniques. De même, les 30 sondes

de plâtre mises en place sur le bassin de Tsimandaha nous ont permis d'apprécier la vitesse de dessiccation du sol au cours des périodes de sécheresse et le danger tout particulier de ces dernières au cours de la saison chaude.

## BILAN DE L'EAU D'UNE RETENUE COLLINAIRE DESTINÉE A L'IRRIGATION DANS LE NORD-OUEST

### BILAN DE L'EAU.

Le tableau ci-après reprend, pour les 4 campagnes de mesures, les résultats du bilan de l'eau dans lequel nous avons séparé les petits débits (petit déversoir et vannes d'irrigation) des débits des crues.

Ce tableau nous montre une constance remarquable des résultats de ces 4 années en fonction de la pluviométrie. Le débit total écoulé correspond en moyenne à 50 % de cette pluviométrie et il comprend à la fois le débit propre des crues (26 %) et les débits utilisables (déversoir + vannes = 24 %). Il faut noter que ces derniers présentent une remarquable homogénéité d'une campagne à l'autre, alors que les débits de crues sont beaucoup plus fluctuants suivant l'état de dégradation du bassin et l'agressivité du climat. A ce sujet, il est intéressant de remarquer que le bassin avait brûlé en 1967, et qu'il a brûlé à nouveau en novembre 1970, ce qui explique la remontée du coefficient de ruissellement à 26 % en 1970-71 malgré une campagne beaucoup moins arrosée que les autres. Ici encore nous observons l'EFFET NÉFASTE DU FEU DE BROUSSE sur l'augmentation des débits de crue, effet qui a été démontré de

façon beaucoup plus nette en parcelles élémentaires où la parcelle brûlée donne en moyenne 60 % de ruissellement alors que sur la parcelle mise en défens celui-ci passe de 50 % à 35 % en 3 ans.

La figure n° 76 reprend le débit total cumulé ainsi que le débit propre des crues et les débits utilisables pour les 4 campagnes de mesures. Nous voyons que, si le débit total reste relativement constant en fonction de la pluviométrie, par contre, le débit propre des crues fluctue beaucoup plus d'une campagne à l'autre.

### CLASSEMENT DES CRUES EN FONCTION DU VOLUME RUISSELÉ ET DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT.

La figure n° 77, ci-jointe, donne pour les 135 crues observées (supérieures à 1 % de la pluie) leur classement en fonction du volume ruisselé (écoulement pendant la crue + variation de volume de la retenue — débit permanent pendant la crue) et du coefficient de ruissellement qui en découle.

Comme nous n'avons ici qu'un seul bassin versant, il n'est pas possible de comparer ces résultats

TABLEAU N° 59

Campagnes		Pluviométrie	Petits débits		Débits de crue ruissellements	Débit total
			Vannes	Petit déversoir		
1968-69	mm	2.027	254	237	675	1.166
	%	100	13	12	33	58
1969-70	mm	2.044	252	236	418	906
	%	100	12	12	21	44
1970-71	mm	1.731	166	225	455	846
	%	100	10	13	26	49
1971-72	mm	2.064	351	174	460	985
	%	100	17	8	22	48
Moyenne	mm	1.967	256	218	502	976
	%	100	13	11	26	50

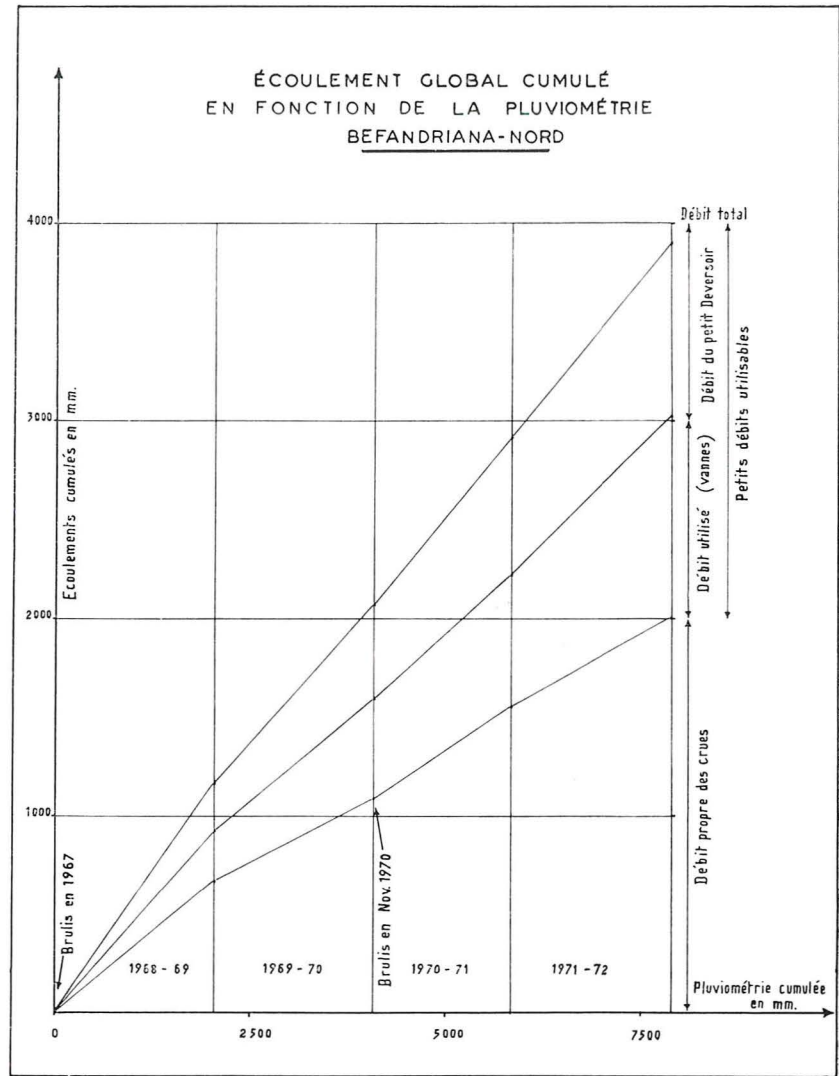
FIG. 76.

sous différents couverts comme sur les autres stations, mais il est intéressant de les comparer à ceux de ces dernières. Les tableaux n<sup>os</sup> 60 et 61 reprennent quelques valeurs caractéristiques des différents bassins étudiés dans ce rapport en exprimant ces classements pour une *année moyenne*.

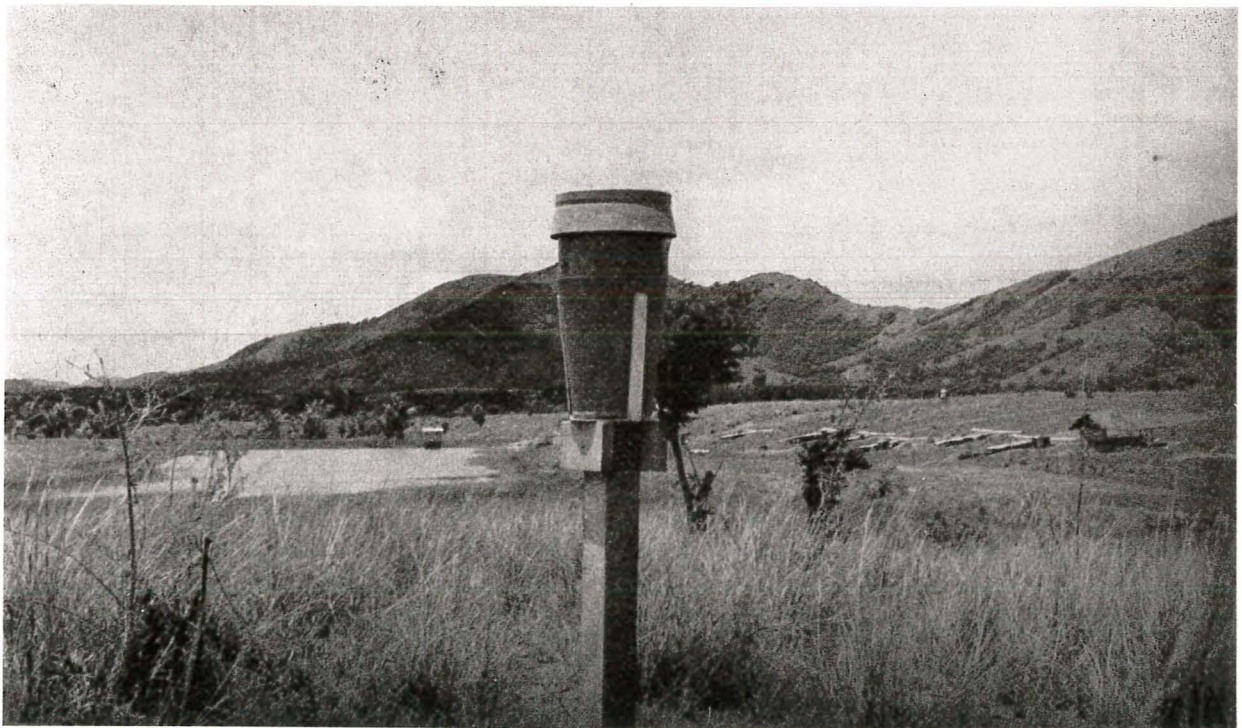
Ces tableaux nous montrent les caractéristiques extrêmes des ruissellements rencontrés à Befandriana-Nord, qui dépassent de très loin tout ce que nous avons trouvé sur les autres stations.

#### CLASSEMENT DES CRUES EN FONCTION DU DÉBIT INSTANTANÉ MAXIMAL.

Les débits de pointe ont été enregistrés à la sortie du déver-



*Befandriana-Nord. Vue du bassin et de la retenue.*



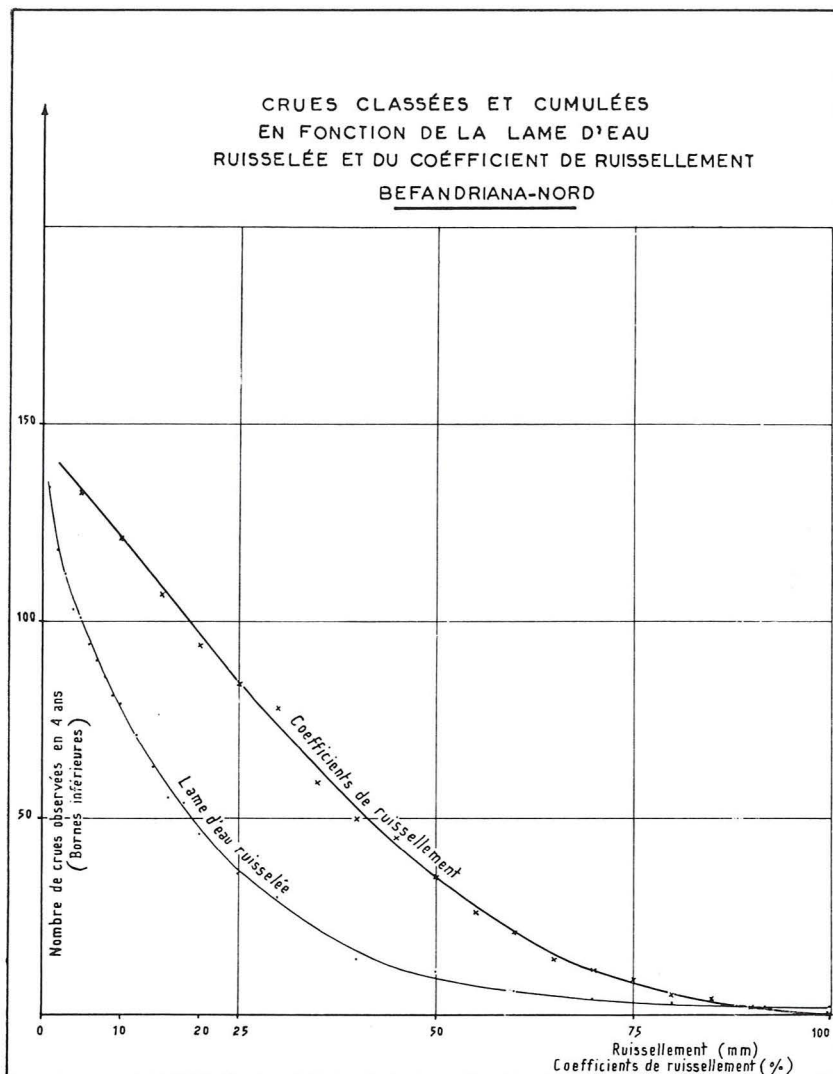


Fig. 77.

soir de crue de la retenue ce qui a amené un laminage non négligeable de ces débits. Malgré ce laminage (accumulation d'une lame d'eau importante dans la retenue avant son écoulement) nous avons observé au cours des 4 campagnes des débits de pointe supérieurs ou égaux à 150 l/s/ha et même, en janvier 1971 un maximum maximorum de 224 l/s/ha ce qui correspond à ceux observés sur Périnet bassin versant 73 (Tavy) et à Manankazo sur le bassin versant 3 (Brûlé) beaucoup plus petits et sans aucun laminage.

#### CONCLUSION.

Dans cette étude, le but recherché n'était pas, comme précédemment, la comparaison de différents couverts, mais simplement la détermination des caractéristiques hydrologiques d'un petit bassin équipé d'une retenue collinaire. Ce but a été très largement atteint malgré la brièveté de l'expérimentation, grâce au nombre particulièrement élevé de crues observées durant ces 4 campagnes (près de 35/an).

Ces résultats sont résumés ci-après :

— le déficit d'écoulement est

TABLEAU N° 60

Bassin versant	Classement des crues suivant le coefficient de ruissellement					Durée d'observation
	Nombre moyen de crues/an à coefficient supérieur à					
	75 %	50 %	20 %	10 %	1 %	
Befandriana-Nord .....	2,3	8,8	23,5	30,4	34,0	4 ans
Périnet D4 .....	0	0	0,4	1,1	15,3	10 ans
D5 .....	0	0	0,4	1,0	16,4	
D7 .....	0	0,3	2,6	5,2	17,9	
73 .....	0	0,3	2,7	4,3	7,1	
Manankazo B. V. 1 .....	0	0,2	4,0	7,1	12,0	11 ans
B. V. 3 .....	0	1,0	9,1	13,7	21,6	
Antanimora Tsimandaha ...	0	0	0,3	0,5	1,3	6 ans
Ianamalora ...	0	0,2	3,0	5,0	10,5	

TABLEAU N° 61

Classement des crues suivant le volume ruisselé						
Bassin versant	Nombre moyen de crues/an à volume supérieur à					Durée d'observation
	100 mm	50 mm	20 mm	10 mm	1 mm	
Befandriana-Nord .....	0,5	2,8	11,5	19,8	33,5	4 ans
Périnet D4 .....	0	0,2	1,0	1,9	8,5	10 ans
D5 .....	0	0,1	0,9	1,5	7,2	
D7 .....	0,3	1,0	3,1	5,2	11,2	
73 .....	0,3	1,0	1,4	2,3	6,7	9 ans
Manankazo B. V. 1 .....	0,1	0,2	1,6	4,0	11,2	11 ans
B. V. 3 .....	0,2	0,7	2,9	7,2	20,2	
Antanimora Tsimandaha ...	0	0	0	0,3	2,8	6 ans
Ianamalora ...	0	0	0,3	2,0	8,1	

de l'ordre de 50 %, mais il a diminué en 1970-71, malgré une campagne beaucoup moins arrosée que les autres, sans doute, par suite de l'augmentation du ruissellement due à l'incendie de novembre 1970 ;

— les débits utilisables restent très constants et égaux à 24 % de la pluviométrie, ils représentent environ 3 à 5.000 m<sup>3</sup>/ha de bassin versant ce qui est remarquable et pourrait sans doute être encore augmenté par récupération d'une partie des débits de crues (20 à 50 % de la pluviométrie) évacués en pure perte ;

— enfin, le débit spécifique maximum est de l'ordre de 250 l/s/ha, malgré le laminage dû à la

retenue, ce qui oblige à dimensionner très largement les évacuateurs de crue et interdit pratiquement la construction d'ouvrages légers sur de trop grands bassins.

La comparaison de ces résultats avec ceux des autres stations étudiées plus haut nous montre que cette région présente des caractéristiques extrêmes tant en ce qui concerne le climat (violence et volume des averses) que le sol (infiltration très faible).

La combinaison de ces deux facteurs implique de la part de l'aménagiste une très grande prudence et l'application stricte des normes de conservation des sols et de protection des bassins versants.



## RÉSUMÉ — ESSAI DE SYNTHÈSE

L'étude de l'influence sur le ruissellement et l'érosion du couvert naturel et de ses modifications a été entreprise depuis un certain nombre d'années à Madagascar.

Les expérimentations ont été réalisées dans plusieurs zones climatiques de l'Ile et sur plusieurs types de couverture :

### DANS LA ZONE DES HAUTS PLATEAUX.

Dans la zone des Hauts Plateaux (climat tropical d'altitude-sols ferrallitiques pauvres sur roches mères acides), l'expérimentation menée en petits bassins versants comparatifs avait pour but de définir quels étaient les effets des modifications de l'écosystème de steppe à graminées sur les phénomènes de ruissellement superficiel et d'érosion.

Cette expérimentation a démarré en 1963 et se poursuit encore grâce à l'aide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique qui a bien voulu apporter son appui à la réalisation d'une action concertée « Equilibre et lutte biologique » se rattachant au programme MAB 3, dont le point expérimental de Manankazo du Centre National de Recherche Forestière et Piscicole constitue un des volets. Cette aide doit permettre de préciser des points qui n'avaient pas, ou peu, été abordés lors de la première phase expérimentale (eau dans le sol-évolution de la végétation, etc...).

Cette première phase nous a cependant permis d'obtenir un certain nombre de résultats qui ont été explicités et qui portent sur :

— l'effet de la dégradation du couvert sur l'augmentation du ruissellement et surtout sur la nature de ce ruissellement et sur les valeurs maximales observées ;

— l'effet des « aménagements » (mise en culture rationnelle ou reboisement) sur le ruissellement et sur sa nature (diminution des forts coefficients) ;

— l'effet de la dégradation par le feu de la steppe à graminées sur le dépôt des éléments lourds et le transport des éléments fins qui peuvent être importants alors que la steppe à graminées en cours de reconstitution n'est le siège que d'une érosion très faible ;

— l'effet de la mise en culture aménagée sur l'érosion qui, si elle peut provoquer lors de la première année un départ de terre non négligeable, se maintient par la suite à des niveaux très bas ;

— l'effet du reboisement qui, après son installation, est l'objet d'une érosion nulle.

Ces renseignements obtenus à partir de l'expérimentation ont permis également de définir un certain nombre de règles à appliquer pour l'aménagement rationnel des terres au niveau de la ferme et au niveau du bassin versant dans la région écologique des Hauts Plateaux Malgaches.

### EN ZONE FORESTIÈRE.

Les expérimentations entreprises à Périnet depuis 1963 ont eu deux objectifs essentiels : l'étude de l'influence des divers couverts forestiers et l'étude de l'influence des mises en cultures.

La première expérimentation a été menée en bassins comparatifs de superficie moyenne, et couverts soit de forêt naturelle, soit de forêt en voie de reconstitution, soit de reboisement en *Eucalyptus*.

L'expérimentation n'a duré que 10 ans, ce qui est peu pour tirer des conclusions.

Cependant les résultats obtenus, qui ont été explicités p. 29, nous permettent de donner quelques indications de l'effet des couverts testés sur :

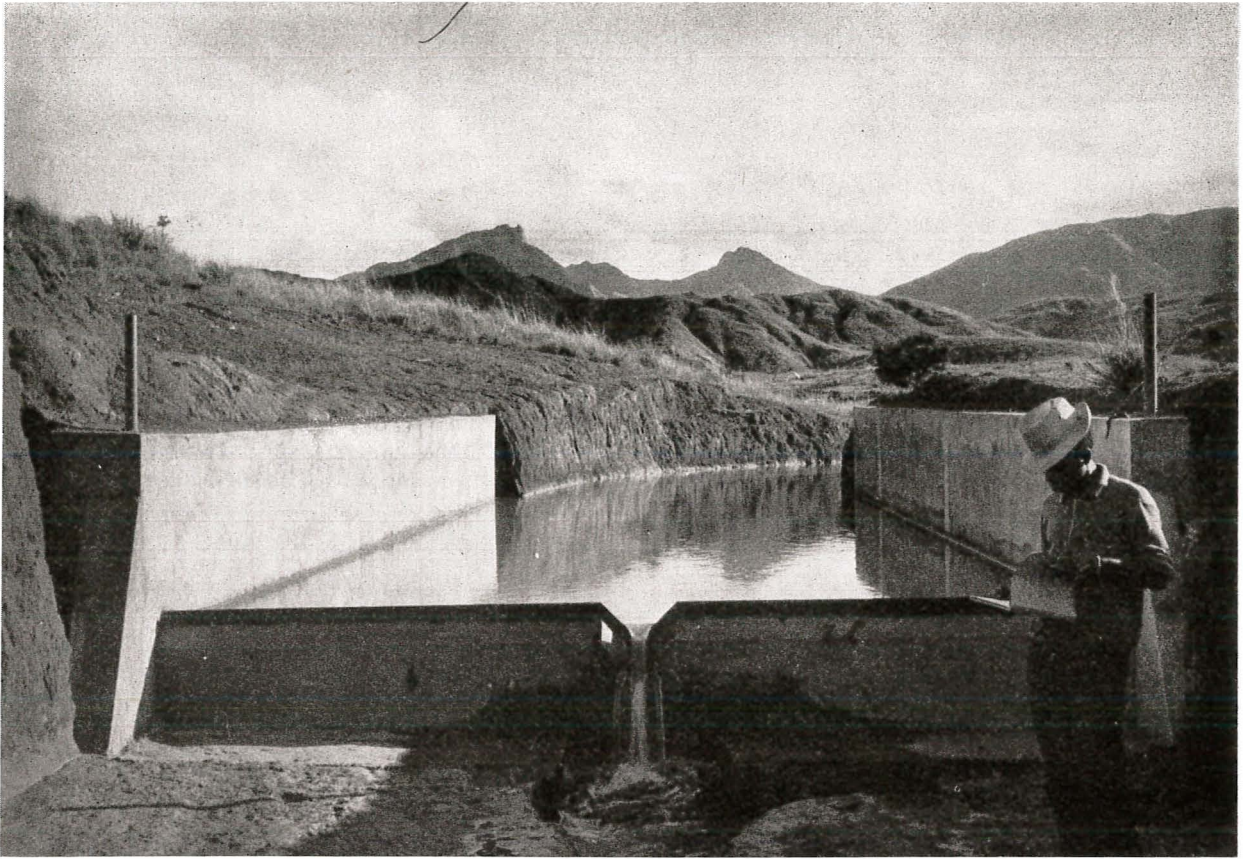
— **le débit d'écoulement.** La forêt naturelle et surtout le peuplement d'*Eucalyptus*, évapotranspire plus que la savoka,

— **Le coefficient de ruissellement.** La végétation forestière diminue dans de notables proportions le coefficient de ruissellement maximum,

— **le déficit spécifique maximum des crues.** La végétation forestière régularise d'une manière très nette l'écoulement des eaux et diminue dans une forte proportion les débits spécifiques des crues exceptionnelles.

Ces indications sont importantes pour le responsable chargé de définir la politique générale d'aménagement de la région Est de Madagascar.

La seconde expérimentation, qui avait pour objectif de connaître les effets des mises en culture



*Befandriana-Nord. Déversoir de crue et goulette de jaugeage.*

en zone forestière, a été réalisée en bassins versants comparatifs de petites superficies selon les principes de l'étude entreprise sur les Hauts Plateaux.

Les résultats obtenus après neuf années d'expérimentation ont été explicités p. 62, ils ont porté essentiellement sur :

— L'effet des modifications du couvert sur le ruissellement superficiel total. La mise en culture avec brûlis amène une augmentation de ce ruissellement par rapport au témoin et à la culture aménagée.

— L'effet de la mise en culture sur les coefficients de ruissellement instantanés et les pointes de ruissellement qui augmentent très fortement avec la culture avec brûlis par rapport au témoin et à la culture aménagée.

— L'effet de la mise en culture sur les pertes en terre (dépôt de fond et suspension) qui, si elles sont nulles sur le témoin, sont assez élevées sur le bassin mis en culture avec brûlis.

Ces résultats peuvent permettre de dégager un certain nombre de principes à appliquer pour tout aménagement en zone forestière.

Le CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL a essayé de mettre ces résultats en pratique dans le

cadre d'un aménagement test réalisé à Beforona-Marolafa en zone forestière avec la collaboration du SERVICE DES EAUX ET FORÊTS (et l'aide du COMITÉ FRANÇAIS DE LUTTE CONTRE LA FAIM).

#### DANS LE SUD.

L'expérimentation réalisée dans l'Androy cristallin sous climat semi-aride, avait pour objectif de voir quel était l'effet de l'aménagement des terrains de parcours sur l'amélioration des ressources en eau.

Le dispositif comprenait deux bassins comparatifs de superficie moyenne dont l'un a été aménagé par des travaux de protection sur son ensemble. Les résultats obtenus après cinq années d'expérimentation, explicités p. 85, ont permis de dégager un certain nombre d'indications sur l'efficacité des travaux réalisés :

— sur l'écrêtement des crues dont les pointes sont sensiblement diminuées sur le bassin aménagé,

— sur l'utilisation de l'eau dont 80 % passent sur le bassin témoin sous forme de crue donc difficiles à utiliser, alors que le bassin aménagé, bien qu'ayant un déficit d'écoulement plus élevé, laisse passer une plus grande quantité d'eau sous forme de petits débits,



*Manankazo. Aménagements en bordure du B. V. 3.*

- sur l'augmentation des débits de saison sèche qui sont en moyenne deux fois plus élevés sur le bassin aménagé,
- sur la diminution de l'érosion.

Ces renseignements, qui mériteraient d'être précisés par de nouvelles expérimentations sur une plus longue période, peuvent donner des règles directrices pour l'aménagement de certaines zones du Sud aride de Madagascar pour améliorer les quantités d'eau mises à la disposition des hommes, des animaux et des plantes.

#### DANS LE NORD-OUEST DE L'ILE.

Une expérimentation a été suivie durant quatre années qui avait pour objectif d'approcher la connaissance des caractéristiques du ruissellement de surface de petits bassins versants destinés à approvisionner des retenues collinaires.

Quelques indications ont pu être dégagées sur l'effet de la modification du couvert bien que l'expérimentation n'ait pas été prévue pour cet objectif et qu'elle n'ait été suivie que trop peu de temps.

L'effet de la mise à feu du bassin sur l'augmentation du ruissellement a été mis en évidence, de plus la comparaison de quelques valeurs caractéristiques

obtenues sur cette expérimentation avec celles des autres points d'essai a montré combien cette zone climatique avait des caractéristiques extrêmes donc qu'il fallait faire preuve, par référence aux expérimentations réalisées dans d'autres régions, d'une extrême prudence dans la manipulation du couvert naturel. De plus des renseignements très intéressants sur la valeur du déficit d'écoulement, les débits spécifiques maximaux, ont été obtenus qui présentent un très grand intérêt pour l'aménagiste chargé de définir les normes des ouvrages de retenue.

#### EFFET DU COUVERT

L'étude comparative de quelques caractéristiques des différents bassins expérimentaux peut permettre de faire également quelques remarques intéressantes sur l'effet du couvert naturel et de dégager quelques idées sur le problème de l'exploitation rationnelle des ressources naturelles de Madagascar.

Le classement des crues suivant le volume ruisselé (tableau 61 et figure 79) fait bien apparaître les caractéristiques extrêmes des ruissellements dans la zone Nord-Ouest de Madagascar dont l'agressivité climatique a été mise en évidence par les



dépouillements des enregistrements pluviométriques pour l'étude de l'équation universelle de perte en terre de WISCHMEIER.

A un degré moindre, on peut noter l'importance des ruissellements sur le bassin de prairie brûlée de Manankazo (Hauts Plateaux) sous un climat moins agressif que le précédent. Bien plus faible, le nombre des ruissellements sur le bassin aménagé d'Antanimora est de l'ordre de grandeur de celui des bassins boisés de Périnet (zone forestière) et Manankazo (Hauts Plateaux).

Cette comparaison montre bien l'importance des deux facteurs primordiaux du ruissellement : précipitation et couvert naturel et leur interaction respective.

L'observation de la figure n° 78 qui représente les valeurs maximales annuelles des débits spécifiques instantanés de crue est également intéressante.

On peut en déduire le débit médian (fréquence 50) qui est le suivant pour les différents bassins expérimentaux.

— Befandriana Nord .....	165 l/s/ha
— Manankazo	
• B. V. 3 prairie brûlée .....	160 l/s/ha
• B. V. 4 reboisement .....	17 l/s/ha
— Antanimora-Ianamolora .....	52 l/s/ha
— Périnet	
• D6 savoka .....	26 l/s/ha
• D4 forêt naturelle .....	10 l/s/ha

Ce classement permet de voir combien l'effet du couvert s'avère essentiel sur le débit de pointe et ceci sous des climats nettement différents.

Ces observations, ainsi que les résultats développés tout au long de l'exposé, permettent de dégager dès à présent, et en attendant des précisions que ne manquera pas de donner la poursuite des expérimentations, quelques grandes idées sur l'effet des couverts naturels et leur modification à Madagascar.

La couverture forestière, qu'elle soit native ou le fait d'un reboisement, joue un rôle important :

— **Sur le déficit d'écoulement** : la forêt évapotranspire plus que la brousse de reconstitution. Le reboisement d'*Eucalyptus* à la station de Périnet a un effet plus accusé que la forêt naturelle : le débit permanent est trois fois plus faible sous couvert d'*Eucalyptus* que sous couvert de forêt naturelle.

— **Sur le coefficient de ruissellement** : la végétation forestière diminue dans de notables proportions les forts ruissellements.

— **Sur le débit spécifique des crues** : la couverture forestière régularise d'une manière très nette l'écoulement des eaux.

Les débits spécifiques des crues exceptionnelles sont une fois et demie à deux fois plus forts sur les bassins dont le couvert dégradé est une savoka, que sur les bassins qui ont une couverture boisée.

Si l'expérimentation avait pu faire intervenir un bassin à couvert plus dégradé, il n'est pas illogique, vu les résultats obtenus sur d'autres essais, de penser que ce chiffre aurait été encore plus élevé.

Les effets de la modification du couvert naturel sur le ruissellement et l'érosion sont toujours très grands.

La disparition de la couverture forestière dégradée (brousse de reconstitution ou savoka) et la mise en culture par brûlis (tavy) entraînent, par rapport à l'état précédent, une augmentation du volume et une modification de la nature du ruissellement et provoquent une érosion auparavant presque nulle (15 t/ha de terre entraînée sous tavy).

La dégradation, par mise à feu du couvert, dans l'écosystème de steppes à graminées des Hauts Plateaux ou de l'Ouest, entraîne également une augmentation du volume ruisselé, du pourcentage de ruissellement et du débit de pointe qui peut être multiplié par 2 par rapport au témoin.

A l'inverse, le reboisement, et à un degré moindre la mise en défens de la steppe à graminées, améliore sensiblement les conditions de ruissellement et d'érosion.

Le reboisement en Pins sur les Hauts Plateaux provoque une très notable diminution du ruissellement global et des pourcentages de ruissellement ainsi qu'une réduction, dans un rapport élevé, (supérieur à 2) des débits de pointe ; l'effet de la mise en défens sur les caractéristiques du ruissellement est moins spectaculaire.

Sur l'érosion, par contre, la dégradation par le feu fait apparaître des pertes en terre que la mise en défens limite très rapidement ; sous reboisement les pertes en terre sont négligeables.

Si la destruction du couvert naturel, en particulier pour les mises en culture, a des conséquences particulièrement néfastes pour ce qui est des ruissellements et de l'érosion, les expériences ont montré cependant que cette mise en culture pouvait avoir des conséquences moins graves si elle était faite rationnellement, c'est-à-dire avec aménagement anti-érosif et pratiques conservatoires.

Dans le cas où la végétation naturelle préexistante est une végétation forestière, la culture aménagée laisse passer un ruissellement non négligeable par rapport au témoin mais diminué par rapport au tavy (60 %), dont les pointes sont plus fortes que celles du témoin mais plus faibles que celles du tavy.

Si la végétation préexistante est une steppe à graminées la mise en culture rationnelle diminue dans de notables proportions le volume de ruissellement et les pointes de ruissellement qui avoisinent celles obtenues sous reboisement en pins. L'érosion provoquée par la mise en culture n'est pas négligeable, la première année, mais demeure par la suite presque nulle.

Répartition statistique des valeurs maximales  
annuelles des débits spécifiques instantanés de crue.

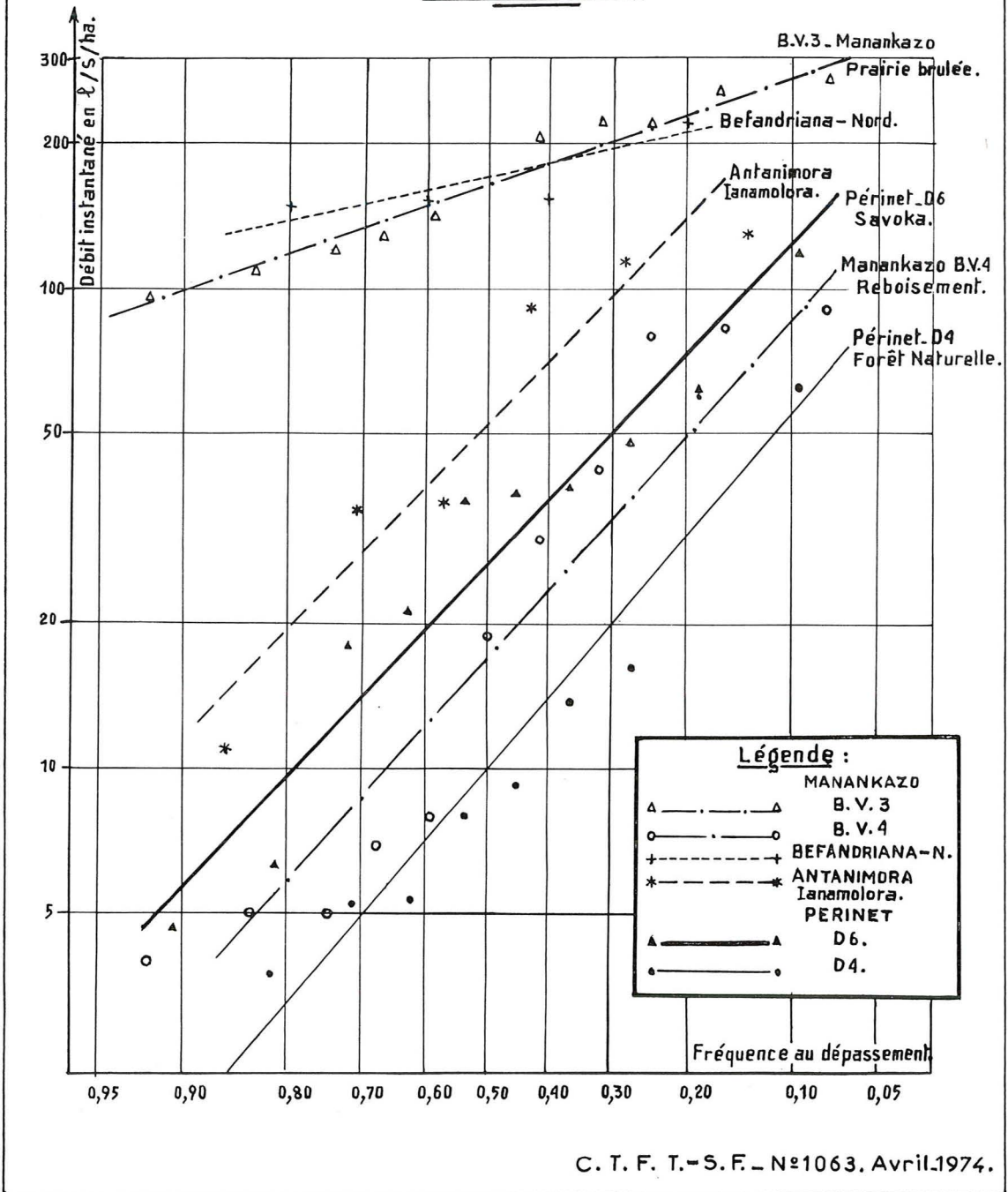


FIG. 78.

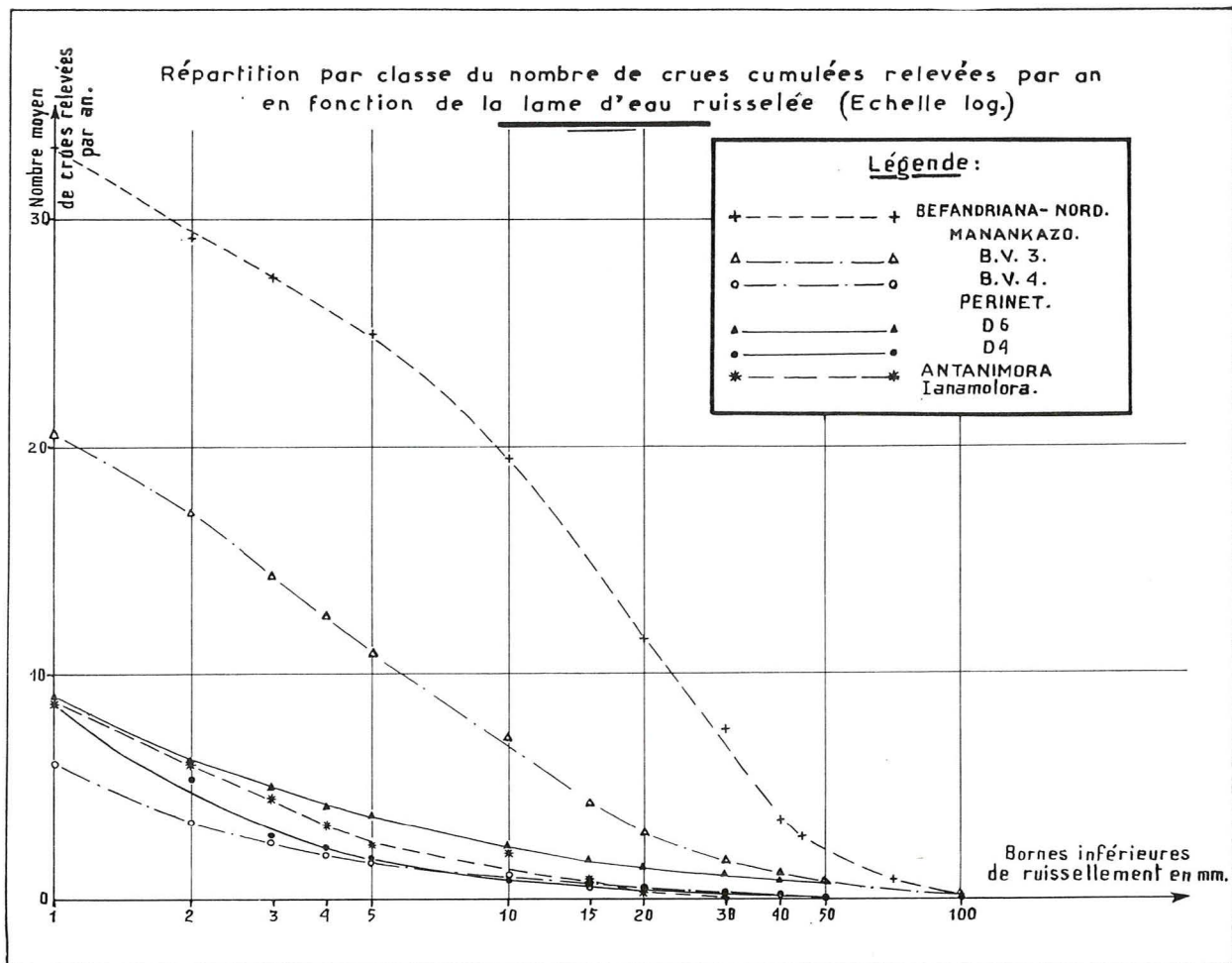


FIG. 79.

Les travaux de protection effectués sur le bassin versant dégradé (expérience d'Antanimora) associés à une mise en défens partielle, se montrent très efficaces vis-à-vis de l'économie de l'eau. Les pointes de crue sont réduites dans d'importantes proportions (6 à 7 fois), la quantité de l'eau utilisable est plus importante par diminution des volumes de crue, augmentation des petits débits et amélioration de l'étiage.

Ces grandes indications chiffrées, découlant des observations expérimentales réalisées pendant une période assez longue, permettent, bien qu'elles n'aient pas de caractère définitif, une approche du problème du maintien des facteurs de production dont l'importance est considérable à Madagascar. Elles permettent d'orienter l'aménagiste et le décideur confrontés avec les problèmes pratiques de mise en valeur.

Si l'utilité de la forêt pour la conservation du sol et la régulation de l'eau est évidente pour tous, il était important de quantifier, ou plutôt d'essayer de quantifier ces effets, et de définir dans quelle

mesure la dégradation ou la destruction du couvert forestier influait sur les paramètres hydrologiques et le maintien des sols. Le problème des cultures en zone forestière a été abordé et les résultats obtenus ont montré combien il fallait être prudent et s'entourer d'un maximum de précautions, la culture après brûlis sans aménagement ayant des effets désastreux.

Lorsque le couvert naturel n'est pas un couvert forestier l'expérience a montré également combien les modifications de l'écosystème par l'homme pouvait avoir des conséquences néfastes. Par contre, les pratiques qui favorisent la reconstitution du couvert naturel (mise en défens) ou qui amènent le remplacement de la couverture végétale naturelle préexistante par une autre (cultures aménagées-reboisement), peuvent avoir un effet très favorable sur les phénomènes de ruissellement et d'érosion.

Mais trois remarques doivent être faites qui permettent de replacer les résultats obtenus et les enseignements tirés à leur juste place.

Tout d'abord la première a trait à la durée de

l'expérimentation ; par suite de la grande variabilité de certains paramètres influents, il est nécessaire de poursuivre les observations durant une période assez longue, 10 ans paraissant être un minimum. Certains résultats seront donc affinés par la suite, mais il n'était cependant pas inutile de faire état des premiers renseignements obtenus, la recherche en cette matière n'étant encore qu'à ses débuts.

La deuxième a trait à la localisation des expérimentations ; les résultats obtenus sur chacun des points d'expérimentation nécessitent d'être transposés dans une autre région de Madagascar avec prudence. Il serait bon d'ailleurs que le réseau d'observations sur l'effet des couverts naturels et de leurs modifications soit étendu aux diverses grandes zones naturelles.

Enfin, si quelques points ont pu être éclairés, il n'en demeure pas moins, outre les remarques précédentes, que bien des questions se posent et qui mériteraient d'être abordées par un travail interdisciplinaire. C'est déjà le cas sur les Hauts Plateaux où l'étude commencée va se poursuivre dans le cadre d'une action concertée financée par la D. G. R. S. T. regroupant les chercheurs de plusieurs disciplines du GERDAT et de l'ORSTOM. Cette recherche, prévue au programme MAB-MADAGASCAR est menée au sein du CENTRE NATIONAL DES RECHERCHES FORESTIÈRES ET PISICOLÉES (C. N. R. F. P.). Cela pourrait être le cas pour la forêt naturelle où les résultats et l'expérience acquise sur le terrain devraient permettre de faire de la station forestière de Périnet, où ces recherches ont démarré depuis dix ans, le siège d'une recherche interdisciplinaire menée sous l'égide du C. N. R. F. P. pour l'étude des caractéristiques de l'écosystème forestier tropical et de leurs modifications (allant jusqu'à la mise en culture).

Après la FAO, l'UNESCO et l'UNEP viennent de reconnaître, dans le cadre des programmes MAB, l'importance des forêts tropicales ; l'un et l'autre mettent l'étude de l'écosystème des forêts tropicales parmi leurs préoccupations les plus urgentes.

Enfin le problème des effets de la substitution à la steppe à graminées d'un couvert forestier par reboisement de très grandes surfaces, pourrait faire l'objet d'une étude interdisciplinaire concertée ; car, jusqu'à présent, l'expérimentation n'a toujours porté que sur de petites superficies intéressées par les dispositifs des petits bassins versants comparatifs.

Il serait très intéressant de suivre, à l'occasion de la réalisation d'un très grand programme de reboisement portant sur un bassin versant de plusieurs centaines de milliers d'hectares, toutes les modifications sur le plan qualitatif et sur le plan quantitatif apportées par cette transformation de l'écosystème à tous ses composants (flore, faune, sol, climat, etc...).

Si les moyens existaient, une telle recherche dont l'intérêt dépasserait le cadre de Madagascar, pourrait être réalisée à l'occasion du reboisement industriel du Haut Mangoro qui doit transformer le haut bassin versant de ce fleuve en y créant plus de 60.000 ha de plantation de Pins durant les 15 prochaines années.

Si de telles expérimentations pouvaient se mettre en place, il serait alors possible, d'ici quelques années, d'avoir une connaissance bien meilleure de l'effet des modifications que l'homme est susceptible d'apporter aux écosystèmes et d'éviter que des méfaits désastreux et souvent irréversibles ne soient commis qui risquent de détruire l'équilibre naturel qui conditionne la survie de l'homme.





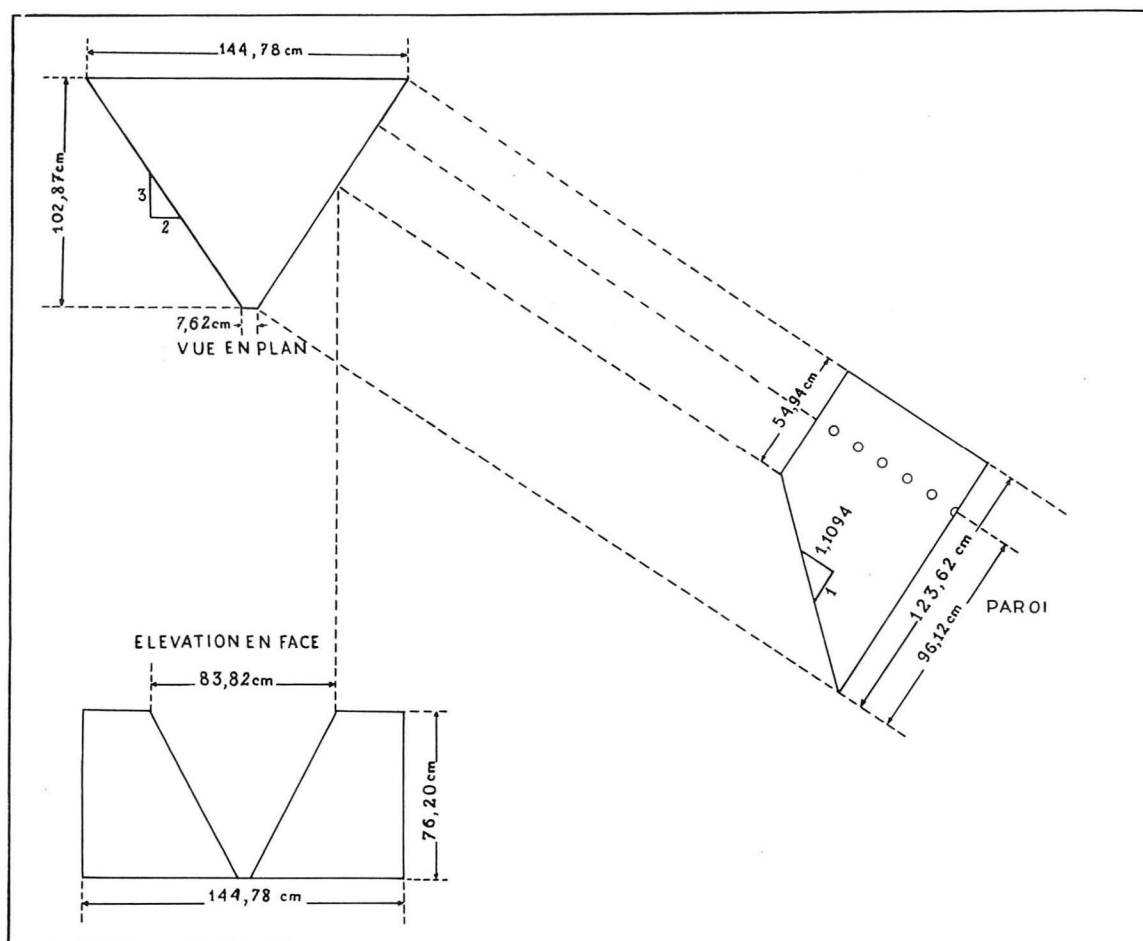


FIG. 81. — Canal calibré type H. Bassin versant de Manankazo.

## ANNEXE II

### ÉTUDES DU BILAN DE L'EAU DES GRANDS BASSINS VERSANTS DE PÉRINET

TABLEAU N° 62. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin versant D1 Superficie : 9,18 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	2.228	636	13	649	50,7	700	92,3	8,0	31,4
1965-66	4	1.897	416	6	422	16,5	438	95,1	3,9	23,1
1966-67	5	1.690	254	5	259	8,6	267	95,1	3,2	15,8
1967-68	6	2.078	416	13	429	33,3	463	89,9	7,2	22,2
1968-69	7	1.909	389	14	403	27,1	430	90,4	3,4	22,5
1969-70	8	2.353	432	8	440	38,3	478	90,3	8,0	20,3
1970-71	9	2.134	552	16	568	44,9	613	90,0	7,3	28,7
1971-72	10	2.487	543	20	563	126,0	690	78,9	18,25	27,7
Total . . . . .		16.776	3.638	95	3.733	345,4	4.079	—	—	—
Moyenne . . . . .		2.097	455	12	467	43,4	510	89,19	8,47	24,31
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		92,3	41,9	—	43,1	12,8	52,3			
Coefficient de va- riation . . . . .		12,4	26,0	—	26,1	83,3	29,0			
Coefficient de si- gnification . . . . .		9,4	9,2	—	9,2	29,5	10,2			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 2.210 mm.

TABLEAU N° 63. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin Versant D2 Superficie : 7,14 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	2.212	621	15	636	45,4	681	91,0	6,7	30,8
1965-66	4	1.905	514	5	519	21,5	541	94,9	4,0	28,4
1966-67	5	1.707	338	6	344	17,6	361	93,6	4,9	21,1
1967-68	6	2.116	492	22	514	52,0	566	86,9	9,1	26,7
1968-69	7	1.907	451	28	479	44,2	523	86,2	5,3	27,4
1969-70	8	2.389	485	23	508	60,1	569	85,2	10,6	23,8
1970-71	9	2.117	628	25	653	72,0	725	86,6	9,9	34,2
1971-72	10	2.497	571	64	635	145,0	780	72,8	19,0	31,3
Total . . . . .		16.850	9.100	188	4.288	457,8	4.746	—	—	—
Moyenne . . . . .		2.106	512	24	536	57,2	593	86,39	9,65	28,17
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		92,9	33,8	—	36,6	14,09	46,8			
Coefficient de va- riation . . . . .		12,5	18,6	—	19,3	69,6	22,3			
Coefficient de si- gnification . . . . .		4,4	6,6	—	6,8	24,6	7,9			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 2.175 mm.



TABLEAU N° 64. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin Versant D3 Superficie : 38,88 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	2.231	686	15	701	31,4	732	93,7	4,30	32,8
1965-66	4	1.904	616	8	624	22,2	646	95,2	3,28	34,0
1966-67	5	1.708	432	9	441	12,1	453	95,3	2,67	26,5
1967-68	6	2.145	634	29	663	30,1	693	91,4	4,34	32,3
1968-69	7	1.944	565	18	583	51,6	634	89,1	8,1	32,6
1969-70	8	2.348	614	15	629	59,8	689	89,4	8,7	29,3
1970-71	9	2.066	783	30	813	82,6	895	86,5	9,0	43,3
1971-72	10	2.442	751	33	784	97,2	881	85,2	11,0	36,0
Total . . . . .		16.788	5.081	157	5.288	387,0	5.623	—	—	—
Moyenne . . . . .		2.098	635	19	654	48,4	703	90,22	6,87	35,55
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		86,1	38,9	—	41,5	10,6	50,0			
Coefficient de va- riation . . . . .		11,6	17,3	—	17,9	62,1	20,1			
Coefficient de si- gnification . . . . .		4,1	6,1	—	6,3	22,0	7,1			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 2.160 mm.

TABLEAU N° 65. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES.  
Bassin Versant D4 Superficie : 200,96 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	2.155	877	16	893	48,7	941	93,1	5,2	43,6
1965-66	4	1.920	712	6	718	8,2	726	98,0	1,1	37,8
1966-67	5	1.705	510	9	519	13,5	532	95,8	2,5	31,2
1967-68	6	2.161	675	40	715	50,4	765	88,2	6,6	35,4
1968-69	7	1.935	669	20	689	30,1	720	92,9	2,8	37,2
1969-70	8	2.361	715	23	738	51,1	789	90,6	7,9	33,4
1970-71	9	2.006	784	25	809	62,8	871	89,9	7,2	43,5
1971-72	10	2.406	774	34	807	134,3	941	82,2	14,2	38,1
Total . . . . .		16.649	5.716	172	5.888	399,1	6.285	—	—	—
Moyenne . . . . .		2.081	714	22	736	49,9	786	90,95	6,35	37,75
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		83,5	37,8	—	39,0	13,8	47,8			
Coefficient de va- riation . . . . .		11,3	15,0	—	16,0	78,6	17,2			
Coefficient de si- gnification . . . . .		4,0	5,3	—	5,3	27,8	6,1			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 2.148 mm.

TABLEAU N° 66. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin Versant D5 Superficie : 13,26 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	1.753	194	10	204	35,0	239	81,5	14,6	13,6
1965-66	4	1.388	94	1	95	5,1	100	93,6	5,1	7,1
1966-67	5	1.343	38	1	39	10,1	50	77,4	21,1	3,6
1967-68	6	1.629	144	20	164	42,8	207	69,5	20,7	12,7
1968-69	7	1.270	130	8	138	26,9	165	78,7	16,3	12,9
1969-70	8	1.645	169	5	174	38,8	213	79,3	18,2	12,9
1970-71	9	1.608	234	18	252	70,1	322	72,6	21,8	20,0
1971-72	10	2.121	262	25	287	142,4	429	60,8	33,2	20,2
Total . . . . .		12.757	1.265	88	1.353	371,6	1.725	—	—	—
Moyenne . . . . .		1.594	158	11	169	46,4	216	73,33	21,54	13,52
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		96,1	25,9	—	28,5	15,4	42,4			
Coefficient de va- riation . . . . .		17,0	46,3	—	47,6	94,0	55,7			
Coefficient de si- gnification . . . . .		6,0	16,4	—	16,8	33,2	19,7			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 1.777 mm.

TABLEAU N° 67. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin Versant D6 Superficie : 7,27 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	1.965	859	23	882	125	1.007	85,3	12,4	51,2
1965-66	4	1.532	515	4	519	12	531	96,8	2,3	34,2
1966-67	5	1.524	389	4	393	29	422	92,1	6,9	27,6
1967-68	6	1.877	668	35	703	119	822	81,3	14,4	43,7
1968-69	7	1.745	597	20	617	+ 77	+ 694	86,1	11,1	39,8
1969-70	8	2.245	805	26	831	125	956	84,3	13,0	42,5
1970-71	9	2.043	862	34	896	225	1.121	76,9	20,0	54,8
1971-72	10	2.147	704	73	777	291	1.068	65,9	27,4	49,6
Total . . . . .		15.078	5.399	219	5.618	1.033	6.621	—	—	—
Moyenne . . . . .		1.885	675	27	702	125	128	815,4	15,15	43,92
Ecart-type sur la moyenne . . . . .		94,9	59,8	—	63,9	33,2	90,9			
Coefficient de va- riation . . . . .		14,2	25,0	—	25,7	75,0	31,1			
Coefficient de si- gnification . . . . .		5,0	8,9	—	9,1	26,5	11,0			

Observations : + = chiffres estimés par corrélation avec ceux de D7

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 1.868 mm.

TABLEAU N° 68. — ÉTUDE DU BILAN DE L'EAU. RÉCAPITULATIONS ANNUELLES  
Bassin Versant D7 Superficie : 31,50 ha

Campagne	N°	Pluie mm	Débit permanent			Débit propre des crues mm	Débit total mm	% débit total		Coefficient écoulement global %
			Hors crues mm	Pendant les crues mm	Total mm			Débit permanent H. C.	Débit propre des crues	
1964-65	3	1.975	896	39	935	164	1.099	81,5	14,9	55,5
1965-66	4	1.569	558	8	563	17	580	96,4	2,9	37,0
1966-67	5	1.510	447	12	459	42	501	89,2	8,4	33,2
1967-68	6	1.847	677	41	718	118	836	81,1	14,1	45,2
1968-69	7	1.750	585	30	615	93	708	82,6	13,1	40,4
1969-70	8	2.227	757	36	793	157	950	79,6	16,6	42,7
1970-71	9	2.037	793	38	831	267	1.098	72,4	24,1	53,7
1971-72	10	2.129	698	74	772	393	1.165	54,8	33,7	54,7
Total.....		15.044	5.411	275	5.688	1.251	6.937	—	—	—
Moyenne .....		1.880	676	34	711	156	867	77,16	17,92	45,61
Ecart-type sur la moyenne .....		91,4	50,8	—	55,0	43,5	89,2			
Coefficient de va- riation .....		13,7	21,21	—	21,9	78,8	29,1			
Coefficient de si- gnification.....		4,9	7,5	—	7,7	27,9	10,3			

N. B. : Pluie de la campagne 2 (1963-64) = 1.769 mm.

## BIBLIOGRAPHIE

### OUVRAGES GÉNÉRAUX

- FOURNIER F., MOULINIER H., MOUREAUX Cl. (1955). — Quelques aspects de la science du sol aux Etats-Unis. Rapport de Mission 1950-1951. Ministère de la France d'Outre-Mer. Dir. de l'Agric. de l'Elev. et des Forêts. *Bull. Scient.* n° 6, août 1955.
- HAULTAU H. N., MINSTALL N. E., HARROLD L. L. (1962). — Field Manual for Research in Agricultural Hydrology. U. S. Soil Conservation Service n° 226, juin 1962.
- LANCASTRE A. (1961). — Manuel d'Hydraulique générale. Eyrolles Ed.
- MALHERBE H. L. (1968). — Afforestation and water supplies in South Africa. S. A. Department of Forestry. Cape Town, 1968.
- NANNI U. W. (1970). — Trees, Water and perspective. *South African Forestry Journal* n° 75, déc. 1970.
- PEGUY. (1970). — Précis de climatologie. Masson et Cie, Paris.
- PELTIER et BONNENFANT. (1967). — Etude d'une méthode de calcul des débouchés à donner aux petits ouvrages d'art à Madagascar. B. C. O. M., 1967.
- RAKHMANOV V. V. (1966). — Role of Forests in water conservation. Traduit du russe par l'Israel Program for scientific translations. Jerusalem, 1966.
- REMIENIERAS. (1972). — L'hydrologie de l'ingénieur.
- RIQUIER J. (1958). — Note sur l'évapotranspiration », de THORNTHWAITE et le « bilan hydrique des sols », in « Le Naturaliste Malgache », tome X (1958), pp. 1-18.
- RIQUIER J. (1963). — Etude d'un sol de tavy et d'un sol de forêt primaire à Périnet. Mém. de l'Inst. Scient. de Mad. Série D, tome V, 1963.
- ROCHE. (1963). — Hydrologie de surface. Gauthier-Villars Paris.
- SOPPER. W. E. (1962). — Influence exercée par la forêt sur son milieu. F. A. O., Rome.
- U. N. E. S. C. O. (1970). — Les bassins représentatifs et expérimentaux.
- U. N. E. S. C. O. (1972). — Bilan et tendances de la recherche en hydrologie, 1963-1974.

### DOCUMENTS CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL

De VERGNETTE J. et BAILLY C. (1965). — Instructions pour le dépouillement des mesures sur petits bassins versants. Document ronéotypé 21 x 27, 8 p., 17 tabl., C. T. F. T., Madagascar.

#### ANTANIMORA

- BENOIT de COIGNAC G. et de VERGNETTE J. — Etude de l'économie de l'eau à Antanimora.
- BENOIT de COIGNAC G., BAILLY C., VERGNETTE J. de, MALVOS C. et HUEBER R. — Economie de l'eau à Antanimora. *Bois et Forêts des Tropiques* n° 136.
- De VERGNETTE J. et BAILLY C. — Premiers résultats sur les bassins d'Antanimora.

#### BEFANDRIANA-NORD

- C. T. F. T.-MADAGASCAR (Division sol-forêt). — Compte rendu de la première campagne.
- C. T. F. T.-MADAGASCAR (Division sol-forêt). — Erosion, ruissellement et bilan de l'eau à Befandriana-Nord. Campagnes 1970-1971 et 1971-1972.
- De VERGNETTE J., BAILLY C., BENOIT de COIGNAC G., MALVOS C., HUEBER R. — Erosion, ruissellement de l'eau à Befandriana-Nord. Résultats des 2 campagnes.

#### MANANKAZO

- BAILLY C. et de VERGNETTE J. — Bassins versants élémentaires (3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> années).
- BAILLY C., de VERGNETTE J., BENOIT de COIGNAC G., VELLY J., CELTON J. — Essai de mise en valeur par l'aménagement rationnel (Colloque sur la fertilité des sols tropicaux).

- BENOIT de COIGNAC G., de VERGNETTE J., HUEBER R., BAILLY C. — Aménagement-Test (1<sup>re</sup> campagne).
- GOUJON P., BAILLY C., de VERGNETTE J., ROCHE P., VELLY J., CELTON. — Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* nos 118-119-120-121.
- MOUTONNET et BENOIT de COIGNAC G. — Contrôle neutronique de l'humidité des sols sur bassins versants expérimentaux de la région des Tampoketsa de Madagascar. Energie nucléaire et ses applications biologiques à Madagascar. *Terre Malgache* n° 12, pp. 89 à 118.
- SOUCHIER B., BAILLY G. — Premières observations sur B. V. élémentaires.
- De VERGNETTE J., BAILLY C. — Observations sur B. V. élémentaires (2<sup>e</sup> campagne).
- De VERGNETTE J., BAILLY C., HUEBER R. — Aménagement-Test (2<sup>e</sup> campagne).

#### PERINET

- BAILLY C., de VERGNETTE J. — Observations sur les bassins versants de Marolaona-Périnet (B. V. n° 71-72-73).
- BAILLY C., de VERGNETTE J., BENOIT de COIGNAC G., HUEBER R. (janvier 1968). — Bassins versants élémentaires de Marolaona-Périnet. Observations réalisées :
- 2<sup>e</sup> année, campagne : 1964-65.
  - 3<sup>e</sup> année, campagne : 1965-66.
  - 4<sup>e</sup> année, campagne : 1966-67.
- NINGRE J. M. (1973). — Etude hydrologique comparative de sept bassins versants de superficie et de couvert différents dans la zone forestière orientale de Madagascar. Station de Périnet-Analamazaotra (campagne 1962-1963 à 1971-1972).
- SOUCHIER B. et de VERGNETTE J. (juin 1964). — Observations sur les bassins-versants de Périnet.

## SUMMARY

### **A study of the influence of natural forest vegetation and its modifications in Madagascar. Experiments in elementary catchment areas**

*For more than ten years, experiments concerning the influence of the natural forest on surface rilling and erosion have been conducted in Madagascar.*

*These experiments, in comparative catchment areas, were carried out in different climatic zones of the island : the high central plateaux, the high-altitude forest zone of the Eastern edge, the semiarid South, and the North-West.*

*In the high plateaux, the effect of modifications made to the natural ecosystem of the graminaceous steppe was revealed, notably in respect of the importance of the deterioration of the vegetation on rilling, the influence of burning on the transport of elements, the effect of « developments » (the introduction of rational crop cultivation, and reafforestation) on rilling, and losses of soil.*

*In the Eastern forest zone, in situ experiments since 1963 have been mainly concerned with the comparison of certain parameters (run-off deficit, maximum specific flow rate, coefficient of rilling) in relation to certain types of forest (natural forest, forest in course of reconstitution, reafforestation with Eucalyptus). In addition, the effects of the introduction of crops in the forest zone were studied, using comparative methods in small catchment areas.*

*In the semi-arid zone of the crystalline South, studies were made on the effect of land development on the improvement of water resources. The results obtained with two comparative catchment areas gave indications as to the efficacy of the work undertaken in relation to the lowering of flood levels, the overall economy of drained water available, the distribution of flows, and erosion.*

*The purpose of the experiments in the North-West was to gain a knowledge of the characteristics of surface rilling on small catchment areas destined for feeding hill reservoirs.*

*On the basis of the results obtained, a number of remarks may be made concerning the effect of natural forest vegetation. Forest vegetation, whether natural or not, plays an important role in flow deficit. Eucalyptus reafforestation and the natural forest have greater deficits than the reconstituted bush. The forest also plays a role in rilling, reducing substantial rilling and specific flow rates in appreciable proportions. The latter are one and a half to two times less in catchment areas covered with forest than in those covered with reconstituted bush.*

*The disappearance of deteriorated forest, burning and putting the ground under cultivation lead to an increase in volume and a modification in the nature of rilling, and cause erosion which did not previously exist.*

*The burning of the graminaceous steppe in the high plateaux and in the North-West also leads to an increase in the volume of rilling and in the peak volume (which may double), and causes erosion. On the contrary reafforestation, and to a lesser degree the reconstitution of the steppe, appreciably improves rilling and erosion characteristics.*

*These experiments also showed that though the destruction of the natural forest, in particular for purposes of cultivation, can have harmful consequences, the implementing of rational development can considerably limit these effects, both in the forest zone and in the high plateaux. And development and protective measures carried out in a deteriorated catchment area in a semi-arid climate were seen to be effective where water economy is concerned.*

*While worth-while results have already been obtained, providing pointers for decision-makers and developers, it must be remembered that in this field, on account of the great variability of certain parameters, observations must be continued over a long period ; and furthermore great prudence must be exercised in transposing elsewhere the results obtained at a given point. It would be desirable for other domains of the influence of natural forest vegetation and its modification to be investigated through a wider interdisciplinary work. This work, using in situ experiments and results already obtained, should relate to the forest ecosystem and its modifications, and the substitution of an introduced forest vegetation for the graminaceous steppe.*

## RESUMEN

### **Estudio de la influencia de la cobertura natural y de sus modificaciones en Madagascar. Experimentaciones efectuadas en cuencas alimentadoras elementales**

*Desde hace ya más de 10 años, vienen siendo emprendidas investigaciones relativas a la influencia de la cobertura natural sobre la escorrentía superficial y la erosión, en Madagascar.*

*Estas experimentaciones en cuencas alimentadoras comparativas se sitúan en diversas zonas climáticas de la isla : Altiplanos centrales, zona forestal de altura del reborde oriental, Sur semiárido y Noroeste.*

*En los altiplanos, el efecto de las modificaciones introducidas en el ecosistema natural de estepa de gra-*

mináceas ha podido ser precisado debidamente, y en particular por lo que se refiere a la importancia de la degradación de la cobertura sobre la escorrentía, la influencia de los incendios sobre los transportes de elementos, el efecto de los « acondicionamientos » (puesta en cultura racional y repoblación forestal), sobre la escorrentía y su género propio y, asimismo, sobre las pérdidas de tierra.

En la zona forestal del Este, la experimentación efectuada desde 1963 se ha referido principalmente a la comparación de ciertos parámetros (déficit de circulación de aguas, caudal específico máximo, coeficiente de escorrentía) según distintas coberturas (bosque natural, bosque en vías de reconstitución, repoblación de eucaliptos). Además, el efecto de las puestas en cultivo en zona forestal ha sido estudiado por medio de dispositivos comparativos en cuencas alimentadoras de pequeña superficie.

En el Sur cristalino, en zona semiárida, el estudio emprendido se ha referido al efecto del acondicionamiento de los terrenos de recorrido para obtener mejoras de los recursos hidráulicos. Los resultados obtenidos mediante dos cuencas comparativas han permitido dar las indicaciones necesarias acerca de la eficacia de los trabajos ejecutados en relación con la laminación de avenidas, de la economía global del agua disponible en el exutorio, el reparto del agua y la erosión.

Finalmente, en el Noroeste, la experimentación emprendida ha tenido por objeto la problemática del conocimiento de las características de la escorrentía de superficie por lo que se refiere a las pequeñas cuencas destinadas al aprovisionamiento de embalses colinarios.

Puede ser presentado cierto número de observaciones, derivadas de los resultados obtenidos, en relación con el efecto de las coberturas naturales.

La cobertura forestal — sea o no natural — desempeña un papel importante en cuanto al déficit del régimen de aguas. La repoblación mediante eucaliptos y el bosque natural tienen déficits más elevados que la selva de reconstitución. La cobertura desempeña también un papel en cuanto a la escorrentía y los caudales específicos, los cuales son de una vez y media a dos veces más reducidos en las cuencas cubiertas de bosques que en aquellas cubiertas por la selva de reconstitución.

La desaparición de la cubierta forestal degradada y la puesta en cultivo de terrenos previamente incendiados, acarrearán un aumento del volumen y una modificación del género de la escorrentía y provocan una erosión que, previamente, era inexistente.

La degradación por incendios provocados en la estepa de gramíneas de los altiplanos o del Noroeste da lugar también, por su parte, a un aumento del volumen de escorrentía y del volumen hídrico de punta que puede quedar duplicado y que desencadena así la erosión. Inversamente, la repoblación y, a un menor grado, la reconstitución de la estepa por la aplicación de métodos de defensa, mejora muy apreciablemente las características de la escorrentía y de la erosión.

La experimentación llevada a cabo ha permitido demostrar también que si la destrucción de la cubierta natural, en particular por la puesta en cultivo de las tierras, puede tener consecuencias nefastas, la aplicación de procedimientos racionales de acondicionamiento permite limitar considerablemente tales efectos, tanto en zona forestal como en los altiplanos. Finalmente, los trabajos de ordenación y acondicionamiento y protección que se han llevado a cabo en una cuenca alimentadora degradada han demostrado ser perfectamente eficaces en relación con la economía de aguas obtenida, y ello en un clima semiárido.

Si ya se pueden presentar resultados interesantes, que permiten orientar a los encargados de tomar las decisiones y a los expertos de la ordenación forestal, parece preciso recordar que, en esta materia, y debido a la gran variabilidad de ciertos parámetros, será preciso proseguir las observaciones durante un largo plazo, y que, por otro lado, los resultados obtenidos en un punto precisan, para su transposición a otro, una gran prudencia. Finalmente, sería preciso que otros ámbitos de la influencia de las coberturas naturales y de su modificación, puedan ser abordados por medio de una tarea interdisciplinaria de gran amplitud. Este trabajo, al aprovechar las experimentaciones ya llevadas a cabo y cuenta habida de los resultados obtenidos, debería referirse al ecosistema forestal y sus modificaciones, así como a la sustitución de la estepa de gramíneas por una cobertura forestal introducida.

## ZUSAMMENFASSUNG

### Über den Einfluss der natürlichen Pflanzendecke und ihrer Abänderungen in Madagaskar. Untersuchungen in elementaren Einzugsgebieten

Seit mehr als zehn Jahren sind in Madagaskar Forschungen über den Einfluss der Pflanzendecke auf Oberflächenabfluss und Erosion im Gange.

Diese, in vergleichbaren Einzugsgebieten geführten Untersuchungen werden in verschiedenen klimatischen Standorten der Insel vorgenommen: Zentrale Hochebene, bewaldete Flächen am östlichen Hochrand, halbtrockener Süden, Nord-Westen.

Auf der Hochebene konnte man die Wirkung der dem natürlichen Graslandökosystem beigebrachten Abänderungen bestimmen, besonders was die Bedeutung der Pflanzendeckebeschädigung auf den Oberflächenabfluss, den Einfluss des Anlegens von Buschfeuer auf den Transport der Bestandteile, die Wirkung der « Bewirtschaftung » (rationelle Bepflanzung und Wiederaufforstung) auf den Oberflächenabfluss und seine Natur sowie auf den Bodenverlust, anbelangt.

In dem östlichen Waldgebiet bezogen sich die seit 1963 unternommenen Versuche wesentlich auf den Vergleich von bestimmten Werten (Wasserabflussdefizit, spezifischer Maximalablauf, Oberflächenabflusskoeffizient) je nach verschiedenen Pflanzendecken (Urwald, sich wieder herstellender Wald, Wiederaufforstung mit Eukalypten) Ausserdem wurde die Wirkung von Bepflanzungen in Forstgebieten mit Vergleichsvorrichtungen in Einzugsgebieten kleiner Oberflächen untersucht.

Im kristallinen Süden, in der Halbtrockenzone bezog sich die unternommene Untersuchung auf die Wirkung der Bewirtschaftung der Weidegebieten zur Verbesserung des Wasservorrates. Die mit zwei vergleichbaren Einzugsbetieten erhaltenen Ergebnisse erlaubten Angaben über die Wirksamkeit der unternommenen Arbeiten zu geben in Betreff des Abdämmens des Hochwassers, der globalen Bewirtschaftung des am Ausfluss zur Verfügung stehenden Wassers, der Verteilung des Abflusses und der Erosion.

Endlich im Nord-Westen hat die unternommene Untersuchung zum Ziel sich mit den Eigenschaften des Oberflächenabflusses auf kleinen zur Verproviantierung von Hugelstaubecken bestimmten Einzugsgebieten vertraut zu machen.

Man kann eine gewisse Anzahl, aus den erhaltenen Ergebnissen sich heraustellender Beobachtungen machen über die Wirkung der natürlichen Pflanzendecke.

Die Walddecke ob natürlich oder nicht spielt im Abflussdefizit eine grosse Rolle. Die mit Eucalyptus aufgeforsteten Bestände und der Urwald haben höhere Defizite als das sich wiederherstellende Gestrüpp. Sie wirkt sich auch auf den Oberflächenabfluss aus durch bemerkenswerte Verminderung des starken Abflusses und der spezifischen Strömung. Diese ist eineinhalb bis zweimal kleiner auf bewaldeten Einzugsgebieten als auf jenen mit wiederhergestellten Gestrüpp.

Das Verschwinden der zersetzten Walddecke und der Brandhakkbau haben zur Folge eine Vergrösserung der Menge und eine Veränderung der Natur des Oberflächenabflusses und bringen eine vorher nicht vorhandene Erosion mit sich.

Die durch in Brandsetzen des Graslandes hervorgerufene Beschädigung der Hochebene oder des Nord-Westens erwirkt auch eine Vergrösserung der Gesamtmenge des abfliessenden Wassers sowie der Spitzenmenge die sich verdoppeln kann und die Erosion auslöst. Im Gegenteil verbessern die Wiederaufforstung und, in kleinerem Masse, die Wiederherstellung des Graslandes durch Weideverbot in empfindlicher Weise die Abfluss und Erosions kennzeichen.

Die Versuche haben ebenfalls gezeigt dass, wenn die Zerstörung der natürlichen Pflanzendecke, besonders für Ackerbau, unheilvolle Folgen haben kann, die Ausführung rationeller Einrichtungen diese Folgen beträchtlich einzuschränken erlaubt, sowohl im Waldgebiet als auf der Hochbene. Endlich haben sich die Einrichtungen und Schutzarbeiten auf beschädigten Einzugsgebieten, in halbtrockenen Standorten als sehr wirksam für die Wasserwirtschaft erwiesen.

Wenn man jetzt schon interessante Ergebnisse die es erlauben dem Beschlussfasser und dem Bewirtschaftler Richtlinien zu geben, erhalten konnte, muss man daran erinnern dass in diesem Fach, der grossen Veränderlichkeit gewisser Werte zu Folge es nötig ist die Beobachtungen auf lange Dauer zu verfolgen, dass anderseits, die in einem gewissen Ort erhaltenen Ergebnisse mit grosser Vorsicht anderswo zu übertragen sind und endlich dass es wünschenswert wäre dank einer auf mehrere Wissenschaften erweiterte Arbeit andere Gebiete des Einflusses natürlicher Pflanzendecken und ihrer Veränderung zu studieren. Diese, die bestehenden Versuchsanlagen und bereits erhaltenen Ergebnisse benutzende Arbeit müsste das forstliche Ökosystem und seine Veränderungen sowie die Ersetzung des Graslandes durch eingeführtes Forstpflanzendeck zum Ziele haben.

