

**Influences potentielles des aménagements  
antiérosifs des collines des hauts plateaux  
malgaches dans le projet de protection de la plaine  
de ANTANANARIVO contre les inondations**

Rapport de Mission du 21 avril au 14 mai 1982

**Par ROOSE Eric  
Directeur de Recherche en Pédologie à l'ORSTOM**

**1982**

ROOSE Eric, Centre ORSTOM - B.P. 5045 - 34032 - Montpellier - FRANCE

## INTRODUCTION

Les inondations de la plaine de Antananarivo ont depuis des siècles posé bien des problèmes aux autorités malgaches qui ont tenté d'y remédier par des endiguements successifs pour protéger des crues de l'Ikopa à la fois la ville en pleine croissance, et les rizières dont elle tire sa richesse. Plusieurs études ont déjà été réalisées ces vingt dernières années, qui ont analysé les phénomènes hydrologiques (ORSTOM, 1964-1965) et proposé des solutions variées et complémentaires à ce problème (SOGALAH, 1966-1968) (Saccardy, 1960) visant :

- soit, à améliorer l'écoulement en aval (dragage de chenaux),
- soit, à diminuer les débits de crue en amont (barrages dans les hautes vallées, aménagements DRS des collines).

L'étude actuelle menée par les bureaux d'étude Scet Agri + DINIKA cherche à analyser les conséquences socio-économiques et le coût de chaque solution et à optimiser leurs actions complémentaires. C'est en vue d'étudier l'impact potentiel des aménagements de défense et de restauration des sols (= D.R.S.) des collines sur les débits de pointe des crues de fréquence 1/20 à 1/100 et sur les débits solides (érosion en nappe et ravines) que nous avons effectué une première mission d'orientation. Une seconde mission devrait avoir lieu une fois réalisée l'étude des photo aériennes (1/20.000) de l'ensemble du bassin versant (450.000 ha) : elle nous permettra de situer dans l'espace les zones dégradées et les aménagements à proposer.

Dans cette note nous présentons la synthèse des discussions que nous avons eues avec de nombreux chercheurs (CENRADERU, laboratoire des radio-isotopes, ORSTOM), des observations effectuées au cours de cinq tournées, sur le terrain, et de l'analyse d'une très nombreuse documentation rapportant les essais réalisés par le CTFT, l'IRAT et le CENRADERU. Nous les présenterons sous quatre rubriques :

- 1 - Les résultats des expérimentations concernant la D.R.S.
- 2 - Diagnostic des sols, de l'érosion et du ruissellement sur les collines.
- 3 - Proposition d'aménagement intégré du paysage.
- 4 - Annexes.

Enfin, il m'est très agréable de remercier le personnel de la Scet - DINIKA et les chercheurs rencontrés, pour leur excellent esprit de collaboration sans laquelle il nous aurait été impossible de réaliser cette mission dans cet admirable pays qu'est Madagascar.

## **I - LES RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS CONCERNANT LA D.R.S.**

### **1.1. Les problèmes posés**

On sait que les aménagements DRS peuvent avoir un impact sur les pertes en terre et le ruissellement à l'échelle du champ et des précipitations moyennes ou du bilan annuel (cf. Goujon, Bailly, de Vergnette, de Coignac, Roche, 1968-1974 ; Fournier, 1967, Roose, 1973).

- Qu'en est-il lors des averses de fréquence 1/20 à 1/100, de type cyclonique (durée six jours, hauteur = 600 mm, intensité 10 à 25 mm/h) tombant sur des sols déjà gorgés d'eau ?
- Dans quel délais ces aménagements (agricoles ou forestiers) sont-ils efficaces?
- Comment évolue l'efficacité observée sur parcelles (200 m<sup>2</sup>), sur petits bassins (4 et 30 ha) lorsqu'on passe à l'échelle de bassins de 700 km<sup>2</sup> (à l'entrée de la plaine d'Antananarivo) et de 4.500 km<sup>2</sup> (au seuil de Tendro) ?
- Enfin, quels sont les coûts, les inconvénients et les avantages pour le développement intégré et la région des aménagements proposés ?

Disons déjà qu'il ne nous est pas possible de répondre de façon précise, ni même satisfaisante à toutes ces questions, mais que nous allons tenter de réunir les éléments de réponse disponibles, d'esquisser quelques raisonnements grossiers pour définir des fourchettes et montrer clairement les éléments qui nous manquent - nous réunirons d'ailleurs en annexe quelques thèmes de recherches qui mériteraient d'être développés dans les années prochaines.

## 1.2. Résultats sur parcelles de l'ordre de 200 m<sup>2</sup>

Tableau 1	KRAM %	E t/h
Prairies naturelles : - en défens	2 - 6	environ 0
- brûlée un an sur deux	4 - 17	1 à 3
Prairie artificielle : - première année	2 - 8	0,1 à 20
- ensuite	1 - 3	environ 0
Forêt installée (plus de 10 ans)	0 - 2	environ 0
Sol nu (Wischmeier)	?	20 à 500
Cultures (maïs, arachide, manioc, etc...)	2 - 30	0,2 à 40

KRAM = coefficient de ruissellement annuel moyen = lame ruisselée/Pluie en %

E = érosion en tonnes par hectare et par an.

### Remarques

- Effet très net du feu sur l'augmentation du ruissellement (effet durable) et de l'érosion (seulement l'année du feu).

- Effet protecteur de la mise en défens ou du fauchage sur le ruissellement et l'érosion. Cependant, il faut plus de cinq ans à une parcelle dégradée par le feu pour récupérer une bonne perméabilité de la surface du sol (pellicule de battance transpercée et détruite par la mésofaune).

- Effet positif très net du labour sur l'augmentation de l'infiltration (toujours le problème de la pellicule de battance), mais danger d'érosion lors des grosses averses orageuses du début de saison lorsque la pente est forte et le sol dénudé et finement préparé pour le semis (surtout dans le cas des fines graines de graminées) : d'où le problème de l'installation des prairies temporaires).

- Erosion très faible sous forêt et prairies (= milieu naturel bien couvert) (3 t/ha tous les deux ans si prairies brûlées, ce n'est pas énorme). Cependant, le ruissellement reste fort sous prairies tandis qu'il tend à disparaître à mesure que la forêt occupe le sol (ETR augmente et la litière est une véritable éponge, surtout sous les Pins).

- La mise en culture diminue souvent le ruissellement (effet labour sur infiltration) mais peut entraîner de fortes érosions si le sol est mal couvert (cas du manioc, maïs, arachide, surtout en absence de fertilisation) et la pente forte - d'où l'intérêt d'un aménagement à la fois biologique (fertilisation - rotation - prairies temporaires) et mécanique (terrassment progressif par labour rejeté vers le bas vers une bande d'arrêt qui évolue en talus enherbé).

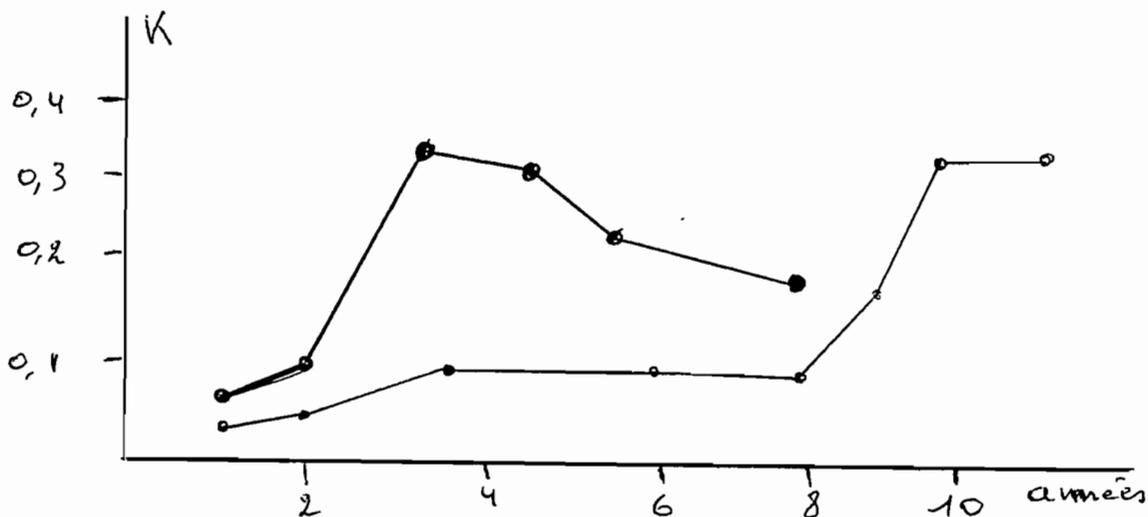
- L'étude des coefficients de l'équation de prévision de l'érosion de Wischmeier a montré que l'agressivité des pluies (RUSA = 300 à 600) est forte mais que les sols ferrallitiques sont plutôt résistants à l'érosion en nappe. On peut distinguer trois classes :

- 0,01 à 0,10 = très résistant (ex. Manankazo, Nanisana)
- K médian** 0,10 à 0,20 = assez résistant (ex. Manankazo, Ambatomainty, Nanokeli)
- 0,20 à 0,30 = moyennement érodible (ex. Kianjasoa)

D'après Wischmeier, l'indice d'érodibilité K varie de 0,01 à 0,70 selon la sensibilité croissante des sols à l'érosion aux USA. En Côte d'Ivoire, les sols ferrallitiques sont également résistants mais cette résistance diminue si l'on passe d'une roche mère sableuse (K médian = 0,1 sur les sols issus des sables tertiaires), d'un granite (K méd = 0,15) ou à un schiste (K méd = 0,20).

- Notons également que l'érodibilité des sols varie dans le temps et au cours des saisons, c'est pourquoi il faut retenir **l'indice médian** (le plus fréquent) il permet d'écarter les influences trop fortes des années exceptionnelles ou des erreurs et non l'indice maximal observé.

L'indice est toujours plus faible les deux premières années = effet résiduel des matières organiques du couvert végétal antérieur (généralement la savane). Ensuite, l'indice peut passer par un maximum avant de décroître si un horizon plus cohérent ou des graviers arrivent en surface du fait de l'érosion et du travail du sol.



Dans d'autres cas, l'indice K peut se stabiliser, puis au bout de 5-7 ans, recommencer à croître jusqu'à un deuxième palier - C'est le cas si l'horizon n° 2 est moins stable que le premier ou si les matières organiques de l'horizon superficiel disparaissent, la structure lâche brutalement (ex. Manankazo). Dans ce cas, on peut craindre qu'une monoculture de manioc sur manioc comme on en observe très couramment en bas de pente, aboutisse à une dégradation très sensible de la structure du sol et de l'ensemble de ses propriétés physiques (infiltration, érodibilité, etc...).

- Il manque encore un test rapide capable de prévoir l'érodibilité des terres prospectées. Le nomographe de Wischmeier *et al.* (1971) semble donner une bonne approximation en Côte d'Ivoire, pourvu qu'on le corrige en fonction du taux de gravier qu'on trouve dans l'horizon labourable (Roose, 1973-1980). Il est basé sur la teneur en matières organiques et la texture (sables grossiers et silt : 10 à 100 microns) de l'horizon superficiel ainsi que sur la perméabilité et la structure du profil.

Lors de la définition cartographique des zones érodibles, il faudra donc tenir compte non seulement de la pente et de la dégradation de la végétation, mais aussi de l'érodibilité des sols (teneurs en matières organiques, en limons et sables fins) et de l'épaisseur des horizons au-dessus de la roche altérée qui elle, ne résiste pas du tout au ruissellement (d'où les lavakas, ravines profondes à lèvres verticales à flanc de colline).

### **1.3. Résultats sur petits bassins versants (Manankazo, surface $\approx$ 4 ha)**

Depuis 1962/1963, ont été mis en place quatre bassins versants de 4 ha environ sur lesquels sont mesurés les pluies, le ruissellement et l'érosion.

L'érosion est remarquablement faible, quel que soit le traitement.

Sur steppe brûlée, elle atteint 300 kg/ha/an l'année où passe le feu et reste négligeable ensuite. Sur steppe en défens, on ne mesure aucune érosion.

Sous forêt, l'érosion est négligeable la première année (travail du sol et billonnage), puis nulle, même la quinzième année où un feu a ravagé le peuplement (effet litière de *Pinus patula* remarquable).

Sous culture aménagée, on a observé 2,5 t/ha la première année, puis plus rien ; il est vrai qu'une zone enherbée occupe le bas du bassin. Il s'avère donc que l'aménagement agricole de ces pentes de moins de 15 % en terrasses progressives sur bandes d'arrêt et cultures suffisamment fertilisées est parfaitement efficace contre l'érosion.

Mais les résultats les plus intéressants concernent l'influence des aménagements agricoles et forestiers sur le ruissellement (tableau 2).

**Tableau 2 - Ruissellement aux bassins-versants de Manankazo**

	KRAM %	KR Max %	Débit Max. de crue l/sec/ha		
			fréq. 1/1	1/20	1/100
Steppe brûlée : - si feux	16 %	50 à 70	180	320	400
- autres années	13 %	40 à 50	-	-	-
Steppe en défens	6,5 %	40 à 50	125	200	250
Cultures	2,6	> 20	45	140	200
Forêt <i>Pinus patula</i> : - 0-5 ans	2	15 à 38	20	95	205
- > 10 ans	0,5	1 à 5	9	30	40

**Observations :**

Par rapport à la steppe brûlée qui occupe la plus grande surface dans le paysage, la steppe protégée ruisselle en moyenne deux fois moins et les aménagements agricoles et forestiers huit fois moins.

Ce qui est encore plus intéressant, c'est que l'écart se creuse encore pour les plus fortes averses (KR Max et débits de pointe de crue) et à mesure que la forêt grandit.

Une analyse fréquentielle des débits de pointe (CTFT, 1978) montre que pour les fréquences rares, les débits tendent à se rapprocher mais restent cependant encore très significativement différentes pour l'aménagement agricole et surtout pour la forêt de Pins de plus de dix ans.

débit max. de crue pour des crues de fréquence 1/20 1/100  
 débit max. de crue : sous culture = 1/3 1/2 des débits sous steppe brûlée  
 forêt > 10 ans = 1/11 1/10 " "

Cependant sur ces petits bassins, on ignore ce que deviennent les écoulements hypodermiques et les écoulements de base qui ne resurgissent que plus bas dans la vallée au niveau des rizières. On ignore le temps que mettent les eaux supplémentaires infiltrées sous les aménagements pour rejoindre la nappe et resurgir aux sources.

Il est cependant peu probable que ces eaux infiltrées participent aux pointes de crue sur des petits bassins de moins de 700 km<sup>2</sup> car il faut plusieurs jours à l'eau infiltrée pour rejoindre la nappe alors que le temps de concentration d'une crue est de 12 à 24 heures (ex. Sisaony à Ampitatafika, ou au km 22, le 21-28/1/1963) et que le débit de base intervient pour 15 % du débit max. de crue et varie peu entre le début et la fin de crue.

Néanmoins, le problème reste entier pour des trains de pluies de type cyclonique ou non qui arrosent tout le bassin de l'IKOPA pendant une semaine, voire un mois comme en 1982.

#### 1.4. Résultats sur des bassins de 30 ha (Ambatomainy)

Deux bassins en steppe à *Loudetia stipoïdes* ont été équipés en vue de la mesure du bilan hydrique : pluie, ruissellement, écoulement de base, évapotranspiration (sonde à neutrons) et drainage (lysimètres).

Après deux années de tarage, le bassin Nord (29 ha) a été aménagé, réservant les fortes pentes à des plantations de *Pinus patula* (± 4 ha) et à des pâturages améliorés en bandes, les pentes de moins de 15 % à des cultures sur terrasses progressives et bandes d'arrêt (5 ha), et le bas-fond à la riziculture (2,5 ha).

##### Bilan :

Pluies	1775 à 2100 mm (erreur due au vent = ± 10 %)
ETP bac Colorado =	1300 mm
ETR bassin Sonde =	750 mm (= déficit d'écoulement)
Déficit d'écoulement =	défens = 795 mm
	aménagé = 832 mm
	environ 800 mm

Tableau 3	bassin versant	prairie en défens	culture aménagée	différence en %
	1973	7,2 %	7,2 %	0 %
<b>KRAM %</b>	1974	5,3 %	4,5 %	0,8 %
	1975	7,9 %	5,9 %	2 %

## **Evolution :**

Depuis l'aménagement agro-sylvo-pastoral, on observe une augmentation très progressive du déficit d'écoulement (2 à 4 % en 2 à 3 ans). On a constaté peu de différence sur les petites crues tant que la forêt avait moins de trois ans. Par contre, on a observé une baisse sensible des volumes ruisselés lors des crues fortes et moyennes.

Le temps de montée a diminué depuis l'aménagement de la rizière (drainage mieux organisé) et lors du feu accidentel de novembre 1973. Quant à l'érosion, elle est négligeable :

7 + 26 (brûlis) + 12 kg/ha/an sous steppe  
9 + 91 (brûlis) + 100 kg/ha/an sous culture

Les défrichements ont donné lieu à une légère augmentation du charriage de fond (9 puis 3 % de l'érosion totale) mais les cuves à sédiments contiennent généralement une majorité de matières organiques et de limons provenant de la rizière.

Notons au passage l'évolution de l'érosion qui passe de :

1 - 3 t/ha/an            sur parcelles  
0,1 - 0,3 t/ha/an       sur bassin de 4 ha  
0,01 - 0,03 t/ha/an    sur bassin de 30 ha

Ces derniers résultats sont encore trop incomplets (arrêt des mesures au bout de trois ans d'aménagement) pour conclure définitivement sur l'efficacité et les délais nécessaires pour que cette efficacité se fasse ressentir à la fois sur les transports solides et les débits liquides maxima des crues. Il est extrêmement souhaitable que les mesures de débit (ne fusse que pendant les grandes crues) soient reprises au plus tôt de façon à préciser à partir de quel âge le couvert forestier influe significativement sur l'écoulement du bassin surtout sur les débits maxima de crue.

### **1.5. Débit maximal de crue, débit de base et temps de montée de quelques crues sur grands bassins**

En vue de nous faire une première idée de l'importance relative du débit de base et du ruissellement lors des crues dans les bassins de plus de 500 km<sup>2</sup>, nous avons réuni au tableau 4 quelques observations effectuées sur la plaine d'Antananarivo en 1964-65 et 77.

**Tableau 4 - Quelques observations sur les crues de 1964-65 et 77**

	Q max. m <sup>3</sup> /sec	Débit base		Temps de montée
		début	fin de crue	
<b>SiSaony à pK22 (630 Km<sup>2</sup>)</b>				
Crue du 21/1 au 28/1/65	140	10	18	env. 24 h
" 27/3 au 3/4/65	135	15	20	env. 20 h
" 28/1 au 6/2/77	160	19	30	env. 24 h
<b>SiSaony à Ampitatafika (726 Km<sup>2</sup>)</b>				
Crue du 21/1 au 28/1/65	98	12	17	env. 48 h
" 01/2 au 23/2/77 (P = 407 mm)	238	8	12	env. 20 h
<b>Andromba à Arivonimam (525 Km<sup>2</sup>)</b>				
Crue du 2/2 au 17/2/77 (P = 518 mm)	84	10	12	24 h
<b>Ikopa à Ambohimanambola (1503 Km<sup>2</sup>)</b>				
Crue du 24/12/64	80	21	25	2,5 J
" 21 au 28/1/75	153	21	27	2,6 J
" 1 au 22/2/77	470	30	40	24 h = temps concentration
<b>Ikopa à Bevohanga (4151 Km<sup>2</sup>)</b>				
Crue du 21/12 au 03/1/65	400	280	310	4,7 J
" du 01/12 au 22/2/77	515	30 ?	40 ?	?

**Observations :**

Dans les crues annuelles, le ruissellement procure toujours la part majoritaire (70 à 90 %) du débit de pointe de crue. Le temps de montée varie de 0,5 à 3 jours en fonction de la taille et du relief du bassin. Il faudrait une étude précise des hydrogrammes de crue de chaque rivière pour vérifier l'importance du temps de concentration des écoulements au droit de l'Ikopa.

## **1.6. Conclusions sur les résultats expérimentaux**

Grâce aux nombreux résultats de mesures à l'échelle de la parcelle et aux quatre petits bassins de Manankazo, on peut dès maintenant, évaluer les risques d'érosion en nappe et l'influence du couvert végétal sur le ruissellement et l'infiltration lors des fortes averses à l'échelle des petits bassins versants de moins de 50 ha (0,5 km<sup>2</sup>). Cependant, on n'a pas d'information précise sur le passage à l'échelle des grands bassins versants comme la Sisaony à Ampitatafika (726 km<sup>2</sup>), l'Andromba à Arivoniman (535 km<sup>2</sup>), l'Ikopa et ses autres affluents à leur arrivée dans la plaine d'Antananarivo.

Le petit sondage rudimentaire que nous avons pu faire dans les observations hydrologiques des années 1964-65 et 77 nous montre bien que la part du ruissellement domine largement celle des écoulements de base (10 à 20 % en général) lors des crues relativement isolées et réduites, mais qu'en est-il lors des crues de fréquence inférieure à 1/20 survenant après une longue série de pluies ? Etant donnée la décroissance de l'infiltration constatée lors des longues expériences d'infiltration et les limites supérieures observées des débits de base des affluents de l'Ikopa, on peut raisonnablement espérer que la part due au ruissellement lors des crues de fréquence rare reste largement dominante (plus de 70-80 %).

Néanmoins, ce point de l'étude (passage à l'échelle des grands bassins et temps de concentration) mériterait d'être approfondi.

## **2. DIAGNOSTIC**

Dans cette section, nous analyserons très brièvement les propriétés des sols des collines et les problèmes que posent la conservation de l'eau et de la fertilité des sols, et les transports solides.

### **2.1. Les sols ferrallitiques des tanety.**

Sur les collines convexes qui composent la majorité du paysage en dehors des bas-fonds, Bourgeat distingue au moins trois groupes de sols ferrallitiques très désaturés sur granite plus ou moins orienté.

- En position de plateau ou sommet de colline sur faible pente, des sols ferrallitiques rajeunis profonds très désaturés à structure plus ou moins dégradée en

profondeur, avec ou sans trace de cuirasse ou de stone line : la zone d'altération est à plus de 150 cm de profondeur.

- Sur les pentes fortes, les horizons A et B du sol ont été profondément érodés et la zone d'altération où il reste des minéraux altérables, est située à moins de 150 cm de profondeur. Il s'agit de sols ferrallitiques pénévulés dont les propriétés sont souvent meilleures (Bourgeat *et al.*, 1972) mais fort érodibles du fait de leur position topographique. C'est sur ces sols, surtout sur altérations profondes de gneiss que se développent les lavaka (Rougerie, 1965, Heusch, 1979).

- En tête des vallons et en bordure des zones hydromorphes des marais, existe une mince frange de sols colluviaux sans cesse alimentés en eau par la nappe phréatique toute proche et légèrement plus riche chimiquement. C'est là que se situe et doit s'organiser une agriculture intensive sur terrasses progressives : vergers, fourrages intensifs, canne à sucre, horticulture et maraîchage.

En général, tous ces sols ont de bonnes propriétés physiques :

- Ils sont résistants à la battance des pluies, tout au moins tant que le taux de matières organiques de l'horizon superficiel est suffisant. D'où l'intérêt de l'usage de fumier, du recyclage des résidus de culture et le rôle de la prairie temporaire (2 à 5 années) pour restructurer les horizons superficiels après une longue rotation culturale.

- Ils ont une bonne porosité totale (40 à 55 %) dont la fraction des macropores assurant une filtration rapide atteint 10 à 25 % en surface et 5 à 10 % en profondeur. Dans la majorité des cas, le sous-solage ne se justifie donc pas sauf en cas de cuirasse ou d'horizons graveleux-compactés peu profonds.

- Si les sols ruissellent beaucoup sous steppe brûlée, c'est à cause de la pellicule de battance continue que la mésofaune (peu dense à cause des feux et du manque de matières organiques) n'arrive plus à percer et à homogénéiser avec l'horizon humifère sous-jacent. Quelle différence d'activité biologique entre la surface de steppe brûlée tous les 2 ans, et celle du bassin de 4 ha de Mamankszo, mis en défens depuis 20 ans (très nombreux rejets de terre par la mésofaune) ! Mais quelques observations que j'ai pu faire sous les litières de Pins, Eucalyptus et steppe brûlée ou en défens, semblent indiquer qu'il y a beaucoup moins de vers de terre et de termites en activité à la surface des sols qu'en Afrique de l'Ouest. Si l'infiltration stabilisée atteint 50 mm/h en profondeur, elle varie de 20 à 30 mm/h dans les horizons labourés et décroît jusqu'à 5 à 10 mm sur sol encroûté par la battance des pluies.

- D'où l'intérêt d'un travail superficiel du sol en grosses mottes. Ces sols argileux bien structurés se comportent généralement comme des sables, atteignant vite la capacité aux champs, mais se ressuyant rapidement et vite secs au toucher. A part quelques sols

dégradés, ils n'ont pas d'horizon compact à faible profondeur et sont donc très rarement temporairement engorgés.

- Par contre, ces sols sont **très pauvres chimiquement**. Les matériaux sont totalement altérés, très acides et désaturés, les matières organiques sont très évoluées (milieu herbacé) et profondément réparties dans les profils : leur capacité d'échange des cations est basse (3 à 6 még/100 g). Les sols sont **profondément carencés et exigent pour leur mise en valeur des matières organiques** (5 à 10 t/ha/an de fumier ou paillis) et **un complément substantiel d'éléments minéraux** (60 N, 60 à 100 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 45 à 60 K<sub>2</sub>O, 250 kg dolomie par ha et par an) à moduler en fonction des cultures). Les plantations de *Pinus patula* réagissent rapidement à une fumure PK qui active leur système racinaire (Malvos, 1980) et double leur croissance. Les eucalyptus demandent en plus de l'azote. La dolomie ne semble pas accélérer la croissance de ces essences forestières.

- La mise en valeur agricole nécessite une rotation convenable des cultures, un minimum de travail du sol et un maximum de fumure organique et minérale.

- L'enracinement superficiel des Pins pourrait bien provenir d'une barrière chimique (pas de nutriments disponibles) plutôt que d'un horizon compact et peu poreux. Ce point est à vérifier par des expérimentations d'enfouissement profond de la fumure de fond (surtout P qui ne migre pratiquement pas).

## 2.2. Les phénomènes d'érosion.

Dans les milieux naturels (forêt ou même prairie brûlée), l'érosion en nappe est extrêmement réduite : 0,1 à 0,3 t/ha tous les 2 ou 3 ans. Le travail du sol et la mise en culture sur les fortes pentes des bas de colline par contre, peut entraîner des pertes en terre non négligeables (E = 5 à 50 t/ha/an) dans la mesure où les sols sont dénudés lors des averses orageuses de début de saison.

Sur sol nu et culture extensive sur sols dégradés, l'érosion en nappe peut être catastrophique (E sol nu = 20 à 450 T/ha/an selon la pente et la dégradation de la structure). Il faut donc prévoir, lors de la mise en valeur, un aménagement DRS très simple, mais très efficace comme l'ont démontré les expériences du CTFT, qui allie une agriculture d'un bon niveau (fumure, rotation, prairie temporaire = méthode biologique) à la mise en place progressive de terrasses quasi horizontales délimitées par un talus enherbé en permanence et drainé en aval (méthode des bandes d'arrêt, CTFT, 1962 à Manankazo, Roose et Bertrand, 1971 en Afrique de l'Ouest).

Mais à l'échelle du paysage actuel dont la majorité est couverte de steppe brûlée, ce n'est pas l'érosion en nappe qui fournit les sédiments à la rivière (0,03 t/ha/an à Ambatomainy) mais bien l'érosion ravinante des Lavakas. Trop rares sont les expérimentations visant à chiffrer les transports solides provenant des lavakas (500 à 600 t/ha/an d'après Roche, cité par Heusch, 1979) et l'efficacité des méthodes de fixations qui ressemblent à celles des corrections torrentielles (seuils empierrés dans le chenal à partir de l'aval puis végétation des versants abrupts d'après Bailly, 1960 cité par Heusch, 1979).

Dans la vallée de la Sisaony, nous avons pu observer de nombreux bancs de sables mi-cassés dans le lit mineur et dans le lit majeur occupé par les rizières. Ces matériaux ne peuvent provenir de l'érosion en nappe (sédiments = limons humifères et pas de mica à la surface des sols) mais de l'érosion ravinante dans les lavakas qui tranche profondément dans la zone d'altération extrêmement friable.

D'après Heusch (1979), les lavakas sont particulièrement nombreuses dans les environs des gneiss profondément altérés et des granites à micas plus ou moins orientés. A l'origine d'une lavaka on trouverait l'organisation en rigole du ruissellement en haut des collines dégradées. A la rupture de pente, ces rigoles s'approfondissent, percent les horizons A et B riches en fer (résistants) et dégagent ensuite dans les horizons d'altération très friables, une gorge très profonde aux parois abruptes qui rejoint rapidement le niveau de base de la vallée (plafond de la nappe permanente). Les lavakas évoluent ensuite par sapement à la base des parois sous l'effet de la pression hydrostatique des eaux infiltrées dans les horizons d'altération, éboulement (d'où des parois verticales) et évacuation progressive des matériaux lors des fortes averses. Adultes, les lavakas présentent un cirque en forme d'entonnoir, un chenal étroit d'évacuation et un cône de déjection,... comme les torrents. Il suffirait de stabiliser le cône de déjection, d'élargir et stabiliser le fond du chenal (seuils empierrés) pour fixer le bas des parois et stabiliser la lavaka. Cela se fait parfois naturellement lorsque la végétation envahit le chenal et se fixe sur les éboulis.

On peut se demander si les lavakas ne sont pas provoquées volontairement par les agriculteurs pour recouvrir d'une couche minérale les sols tourbeux des vallées (le riz y pousse mal) et élargir le domaine hautement productif des bas-fonds. En effet, nous avons observé dans toute la vallée de la Sisaony que les paysans mordillent les bas de pentes et rejettent les déblais sur leurs champs : il arrive qu'ils déséquilibrent ainsi le versant, créant une ravine évoluant en lavaka. On peut observer également que les anciennes lavakas présentent un profil concave bien plus facile à aménager en terrasses irriguées que le profil convexe des collines résiduelles peu productives formant la majorité du paysage. Malheureusement, il n'est pas possible d'encourager "la lavakisation" pour dégager les horizons plus riches du sol car cette pratique entraînerait à

court terme des désordres très graves dans les réseaux routiers et hydrographiques (changement de régime des cours d'eau : augmentation des crues et des inondations et diminution du débit d'étiage).

Pour diminuer les apports de sédiments dans les chenaux de la plaine, on pourrait donc fixer les lavakas et aménager les bas de pente colluviaux en terrasses progressives allongées le long des courbes de niveau et non dans le sens de la pente comme on l'observe actuellement aux endroits peuplés. Enfin, le réseau de piste peut aussi être à l'origine de transport solide non négligeable.

### **2.3. Le problème des écoulements.**

Si l'érosion en nappe n'est pas grave sur les steppes, le ruissellement lors des averses de fréquence annuelle, peut dépasser 50 à 70 % des pluies à cause de la pellicule de battance qui se forme à la surface du sol lorsqu'elle est découverte par le feu ou le surpâturage.

Le travail superficiel du sol (labour en grosses mottes) améliore donc significativement l'infiltration. Le soussolage par contre est moins efficace, sauf s'il existe un horizon tassé, peu perméable, à structure dégradée (par ex. par les nombreux passages de tracteurs et de remorques), à faible profondeur : d'après notre enquête, ce n'est pas le cas général, surtout sur les sols pénévulés des fortes pentes où il va être question de planter la forêt.

La mise en défens de la steppe réduit le ruissellement de moitié ; mais ce n'est pas une solution à long terme car il n'y pousse plus rien d'utile et les risques sont très grands qu'un feu sauvage et très néfaste s'y mette par accident ou à l'occasion d'un orage (foudre). Peut-être faudrait-il penser à des feux précoces, moins destructeurs (moindre mal).

La mise en culture réduit le ruissellement au 1/3 pour les averses de fréquence 1/20 et à la 1/2 pour une averse centennale par rapport à la steppe brûlée. Mais on peut espérer une réduction bien plus forte par rapport aux tanety cultivées en bas de pente de plus de 20-30 %. On pourra donc compter sur ces aménagements agricoles pour réduire le débit de pointe de crue ; malheureusement, ce traitement ne peut concerner que 5 à 10% de la surface du bassin, à moins qu'on laboure les plateaux pour introduire des prairies améliorées.

La forêt de *Pinus patula* (2.000 pieds/ha), de plus de 10 ans, réduit à 1/20 le ruissellement lors des averses annuelles, et encore à 1/10 lors des averses de fréquence centennale. Son impact sur la réduction du débit de pointe des crues de fréquence rare est donc considérable, mais la surface qu'on peut y consacrer n'est pas infinie.

Si on plante en forêt 10 % du bassin (50.000 ha), le débit max de crue = 91,9 %.

Si on plante en forêt 20 % du bassin (100.000 ha), le débit Max de crue = 83,8 %

Si en plus de 10 % de forêt, on aménage 10 % des tanety en terrasses avec labour, on peut encore réduire le débit de base à 87,4 % de débit maximal d'une crue de fréquence centennale dont le débit de base est de 10 %\*.

### Problèmes restant à approfondir :

- On sait l'influence de l'aménagement sur le ruissellement, mais on n'a guère d'indications chiffrées sur son impact, sur le **ruissellement hypodermique** et sur le niveau de base.
- On sait que la forêt d'Eucalyptus ou de Pinus évapotranspire environ 150 à 200mm en plus que la steppe (brûlée ou non, il y a peu de différence) si cette forêt est plantée hors de portée de la nappe. Mais le ruissellement diminue d'autant : le bilan annuel restera donc peu changé. Il serait cependant utile de connaître l'évolution du **débit d'étiage** pour planifier les surfaces irrigables à contre-saison en aval. Les nappes étant mieux rechargées par une plus forte infiltration sous forêt, le débit de base croît ainsi que le débit d'étiage, mais il est bien difficile de l'estimer en dehors de toute expérimentation à l'échelle des grands bassins versants.
- On peut étudier actuellement le **temps de montée** des crues, mais on ignore l'influence des aménagements agricoles et forestiers sur ces temps de montée. Il ne faudrait pas qu'en concentrant les efforts d'aménagement sur la Sisoany, on en étale la crue ou on la retarde au point de la faire coïncider avec celle de l'Ikopa, généralement un peu plus tardive.

---

\* Mode de calcul :

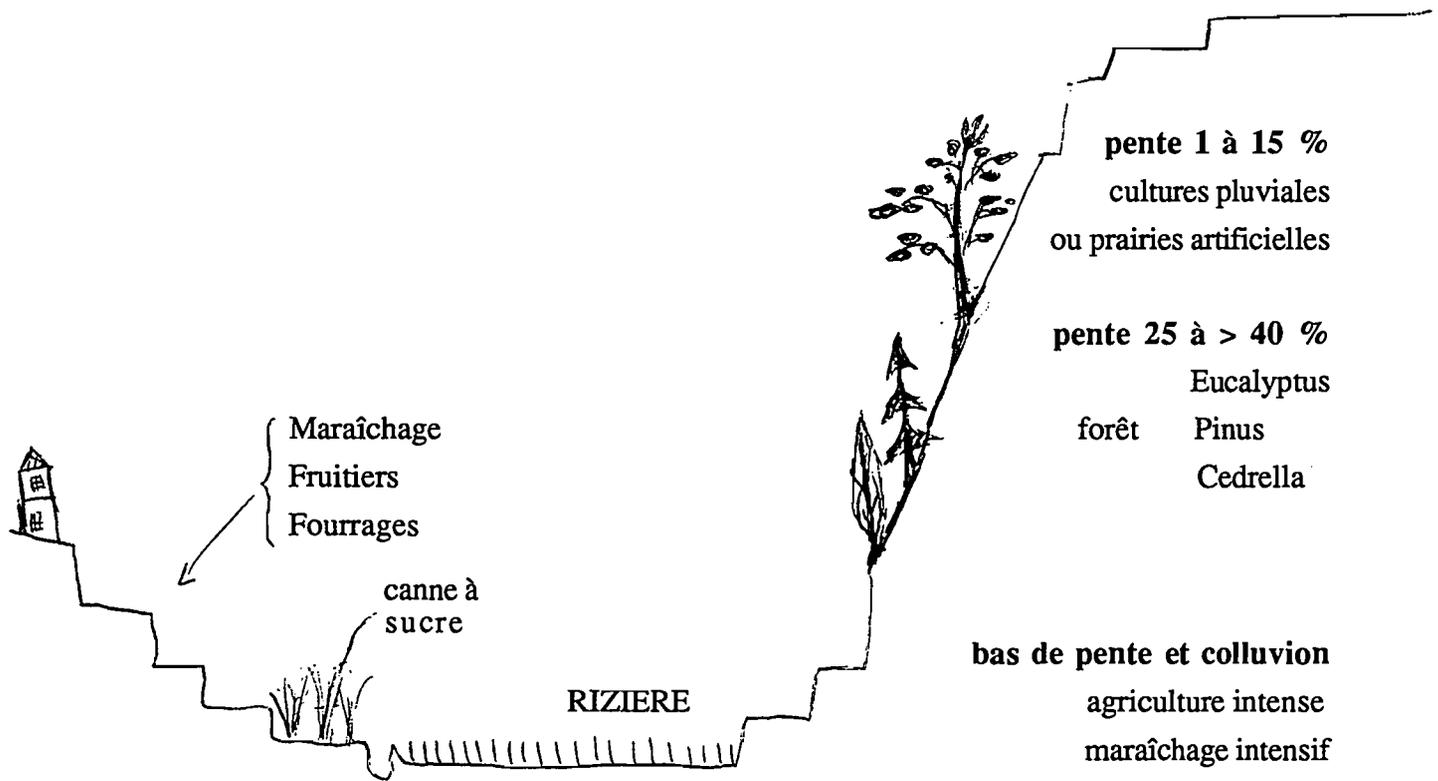
10 % de débit de base .....	= 10
1/10 de forêt à débit 1/10	= 1/100
1/10 de culture à débit 5/10	= 5/100
8/10 de steppe brûlée à débit 10/10	= <u>80/100</u>
Total	86/100 x 0,9 = 87,4 % du débit original.

## 2.4. Conclusions.

On dispose dès maintenant de la plupart des données nécessaires pour proposer un aménagement agro-sylvo-pastoral tenant compte de la nécessité de diminuer l'érosion le plus possible afin d'éviter que les sédiments n'encombrent les chenaux des rivières et surtout, de diminuer le ruissellement qui influence très directement sur les débits max. de crue.

Nous joindrons en annexe une liste des sujets qui mériteraient d'être approfondis pour préciser ce projet de développement.

## 3. PROPOSITION D'AMENAGEMENT AGRO-SYLVO-PASTORAL INTEGRE DU PAYSAGE



Dans le paysage, on distingue très schématiquement le bas-fond hydromorphe réservé à la rizière, les colluvions réservés à l'agriculture intensive, les fortes pentes (15 à > 40 %) de sols pénévulés attribués à la forêt protectrice et le plateau ou les pentes faibles supérieures attribués à l'élevage et à l'extension des cultures.

### 3.1. Plantations forestières.

#### Où ? :

- ni sur les plateaux qui serviront plus tard à l'extension des cultures et des pâturages améliorés, ni sur les colluvions, terres les plus riches et toujours humides (risque d'épuisement des nappes par l'eucalyptus),
- mais sur les plus fortes pentes, là où les sols sont squelettiques ou peu épais (proximité des horizons d'altération où vont plonger les longues racines des arbres), sur les sols ferrallitiques pénévulés et érodés à cause des fortes pentes, donc, sur les zones les plus érodibles et qui ne peuvent être mises en valeur que par une forêt permanente de protection et de production.

#### Espèces ? Essayer de mélanger par groupes différentes espèces :

- *Pinus patula, celotii, kasya, greggii* (en fonction de l'altitude)
- *Eucalyptus robusta, Camaldulensis*
- *Cedrella, Cassia mollis ou dealbata* (tannin), *Grevillea banksii*.

Les eucalyptus sont plus robustes et résistants au feu : il faudrait les situer à l'extérieur des peuplements, en mélange avec des buissons résistants et améliorant la litière.

Les pins sont très sensibles au feu mais donnent une litière bien plus efficace pour retenir l'eau (une vraie éponge) : il faut les élever en vue de produire du bois d'oeuvre au centre des massifs. Une couronne de fruitiers divers (goyaviers, manguiers, etc...) pourrait encourager les paysans à protéger des feux le massif forestier.

#### Comment ?

- Densité 2.000 pieds/ha (2 x 2,5) au minimum.
- Plantation dans des trous d'au moins 40 cm de côté avec formation d'une terrasse individuelle en contre-pente (bourrelet en croissant) et sarclage sur un rayon d'un mètre (contre la concurrence hydrique).
- Fumure importante à mélanger à la terre au fond du trou.  
Pins :                    62 unités de P2O5 + 32 unités de K (pas de N)  
Eucalyptus :                    idem + 20 N
- Semis en pépinière en août puis repiquage avec boulette de terre riche en décembre/janvier (après les rizières) : ou semis direct sur le trou dans de la

bonne terre mélangée de fumier (à mettre au point d'après M. Rakotomanana pour réduire les coûts).

- Prévoir après un ou deux ans, de repasser pour replanter les vides avec des plants vigoureux et épandre une deuxième dose d'engrais si le démarrage des plants est trop lent.
- Plantation en régie (coût élevé, risque élevé d'incendies) ou par des communautés villageoises ou scolaires sous la surveillance d'un technicien des Eaux et Forêts, ou par des privés. Définir le propriétaire des produits et intéresser les villageois aux produits de la forêt créée par eux et pour eux.
- Améliorer les anciennes plantations en replantant les vides, en introduisant des nouvelles espèces (semenciers), en provoquant la régénération naturelle par le griffage et le désherbage du sol en choisissant des portes-graines qui ne seront plus exploités en treillis.

#### **Problème des feux de brousse :**

- Naturels, ou provoqués pour exprimer le mécontentement ou pour régénérer les pâturages, les feux font chaque année des ravages énormes dans les plantations forestières : destruction des jeunes arbres, de tous les pins (sauf s'ils ont plus de 6 mètres et sont ébranchés), destruction de la litière et des racelles qui l'ont envahie.
- Ce problème n'a pas encore trouvé de solution efficace. Tout au plus, peut-on suggérer une forte densité de plantations et la fertilisation pour faire disparaître l'herbe au plus vite et mettre le bourgeon terminal hors d'atteinte des feux, l'ébranchage jusqu'à mi-hauteur, le sarclage progressif de la forêt et d'un coupe-feu alentour. Les lois ne seront pas appliquées tant que les agriculteurs et les pasteurs n'auront pas compris l'intérêt que présente pour eux la forêt qu'ils ont plantée.

#### **Problème des engrais :**

Est-il bien raisonnable de préconiser l'épandage d'engrais sur la plantation forestière alors que la rizière en manque cruellement ? Nous pensons que le choc psychologique que cela peut provoquer n'est pas mauvais s'il attire l'attention des paysans sur l'intérêt que porte la communauté sur la croissance de la forêt. Nous pensons également que **c'est une des clés de ce projet** de conservation de l'eau et des sols. Inutile de planter des arbres si l'on sait pertinemment que plus de la moitié n'arriveront pas à l'âge adulte et que les autres n'auront qu'une faible croissance.

**Pour être efficace, la forêt doit pousser vite et dense.** Etant donnée la pauvreté chimique des sols ferrallitiques de ces paysages, la réussite des plantations forestières dépend bien d'avantage de la fertilisation que du travail du sol comme le montrent les recherches du CTFT et du CENRADERU. (Malvos, 1980 ; Malvos et Bailly, 1980). D'après Malvos (1980), une fois que les Pins ont bien démarré grâce aux engrais, le système racinaire se développe fort et exploite beaucoup mieux les faibles réserves minérales des horizons d'altération que les graminées les plus répandues (*Loudetia stipoides*, *Hyparrhenia*, etc...) de la steppe naturelle qui ne peuvent atteindre ces couches profondes.

### 3.2. Aménagement agricoles en dehors de la rizière.

On leur réservera avant tout les sols colluviaux et les bas de pente (moins de 15 %), sols toujours bien alimentés en eau (proximité de la nappe) et les moins pauvres chimiquement dans ces paysages granitiques. On transformera les champs actuels allongés selon la plus grande pente en terrasses progressives et étroites s'appuyant sur des talus enherbés (y compris une bande enherbée de garde de 30 cm qui protège le talus).

On ne peut espérer y obtenir de bons rendements sans une fumure organique et minérale substantielle à distribuer tout au long de la rotation.

- manioc 2 ans sur défriche : 10 t/ha fumier + 20 N - 100 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 60 K<sub>2</sub>O
- légumineuse (haricot, fumier sur colluvions),
- ou arachide NO - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 60 - K<sub>2</sub>O = 30, ou soja (idem)
- graminée : maïs      N = 70 à 120      P = 60      rendement 45 q/ha,
- ou riz sec              N = 40              P = 50              K = 45 rendement 25 q/ha
- légumineuse arachide - soja (ou pois de terre sur colluvions)
- Pomme de terre (fumier 10 t/ha plus N = 0, P = 60 K = 60) dans laquelle on introduit en janvier une légumineuse
- 2 ans de prairie temporaire (*Stylosanthes gracilis* en plaine, *Desmodium intortum* en altitude > 1.400 mm (difficile à détruire).

Si on introduit une graminée (*Melinis minutiflora*), il faut prévoir une fumure complète à l'installation et de l'azote après chaque fauche sans quoi on viserait le sol.

Il est absolument souhaitable que l'on quitte les anciennes habitudes (manioc sur manioc) si on veut protéger les potentialités de production des sols de bas de pente et réduire l'érosion et le ruissellement, non négligeables sous faible couvert végétal et sols dégradés.

Là où la frange de colluvions est trop étroite, on peut développer l'exploitation agricole des plateaux et hauts de pentes (moins de 15 %) et obtenir de très bons rendements à condition de transformer progressivement la pente en terrasses appuyées sur des talus enherbés et d'utiliser une abondante fumure organique et minérale (N60 P60 K60 + dolomie 250 kg/ha/an en moyenne : ARRIVETS *et al.* 1977 à 1980).

En altitude (> 1.400 mètres), les hivers sont trop froids : manioc, *Stylosanthes* et haricots se développent mal et peuvent être remplacés par des pommes de terre, du *Desmodium* et du soja. Sinon, la rotation peut être la même.

Pour que l'influence favorable de cet aménagement puisse être clairement ressentie, il faut envisager de modifier environ 50.000 ha de cultures actuelles ou de "prairies naturelles". Cela ne se fera que si la pression démographique est suffisamment forte pour que les paysans acceptent de modifier quelque peu leurs habitudes.

### **3.2. Amélioration de l'élevage.**

Les paysans malgaches ont déjà l'excellente habitude d'associer l'élevage et l'agriculture. En dehors du petit bétail (beaucoup d'oies, de canards et de poissons associés à la rizière) à développer, chaque foyer possède un couple de boeufs pour l'attelage, capable de fournir à peu près deux tonnes de fumier (poudrette) : celui-ci est répandu alternativement sur la rizière et les cultures en sec (maraichage). Il pourrait être nettement amélioré par des apports de paille, mais celle-ci fait défaut, les champs donnant très peu de résidus de culture (manioc, arachide, patates, pois de terre, etc...). Seul le maïs donne des tiges qui, après avoir été pâturées, sont brûlées sur place faute de pouvoir être enfouies avec l'angady (pelle locale).

Le bétail manque également de fourrage. Après la récolte du riz, il profite des pailles du riz, puis vient une longue période sèche où les herbes deviennent rares sur les parcours des collines. Le feu n'apporte qu'une herbe rase et les paysans perdent beaucoup de temps à faucher le long des chemins un complément à la ration qui ne permet pas aux boeufs de garder leur forme pour la période des labours.

Il est donc indispensable d'améliorer la production fourragère :

- par 1/4 ha de culture fourragère intensive (*Pennisetum*) sur les colluvions,
- par la prairie temporaire à légumineuse (riche en protéines digestibles),
- par l'amélioration des parcours (labour, fertilisation minimale et introduction de légumineuses et graminées).

Cependant, il doit être clair pour tous que **l'amélioration des pâturages passe nécessairement par la fumure minérale.**

L'effet du travail du sol et de l'introduction d'espèces nouvelles est temporaire et voué à l'échec sans apport de nutriments : les sols sont épuisés chimiquement, mais ont encore des propriétés physiques assez bonnes.

Pour augmenter le volume du fumier et sa qualité, on peut aussi encourager le fauchage ou le sarclage des herbes autour des bosquets, des massifs forestiers et des vergers. Cette pratique effectuée en fin de saison des pluies peut aider à prévenir les feux tout en réduisant la concurrence hydrique des graminées.

### **3.4. Aménagement des lavakas et du réseau de pistes**

Il nous suffira de rappeler ici que les pistes sont une surface nue qui récolte les eaux ruissellantes le long des versants. Avec les lavakas, les pistes entraînent souvent des transports solides non négligeables dans le réseau hydrographique : elles méritent toutes deux d'être aménagées à peu de frais. Il s'agit essentiellement d'éviter que les pistes ne se creusent jusqu'à atteindre les niveaux d'altération extrêmement érodibles : on pourrait les recouvrir de cailloux et/ou de terre ferme provenant des horizons de surface. Un paillis de branchages est aussi extrêmement efficace. L'aménagement des lavakas a déjà été décrit rapidement au paragraphe 2.2.

## **4. CONCLUSIONS**

Ce travail et les suggestions relativement nouvelles qu'il contient, n'aurait pu être réalisé en trois semaines sans l'oeuvre remarquable de recherche en Agronomie, au sens le plus large, déployée à Madagascar depuis plus de 25 ans (en particulier par le CTFT, l'IRAT, l'ORSTOM, le FOFIFA, etc...) et sans l'humble travail de quantité de personnes.

C'est vers eux que je me tourne en soumettant ces quelques propositions à la critique scientifique, pour les remercier, ainsi que tous ceux qui m'ont accueilli et offert si gracieusement leur collaboration.

Antananarivo, le 13 mai 1982

E. ROOSE  
Pédologue ORSTOM



- 2.4. Souchier (B.), 1963 : Parcelles de mesure du ruissellement et de l'érosion. Résultats de trois campagnes d'observation. CTFT : 61 p. multigr.
- 2.5. Vergnette, Bailly, Benoît de Coignac, Malvos, 1969 : Expérimentation en parcelles élémentaires. Influence des couvertures naturelles dans la zone des hauts plateaux. CTFT : 132 p. multigr.
- 2.6. Coignac (B. de), Vergnette (J. de), Hueber (R.), Bailly (G.), 1966 : Parcelles d'érosion. Taheza : cinq campagnes 1961-1966. CTFT : 19 p. multigr.
- 2.7. Goujon (P.), 1972 : Essai de défense contre l'érosion sur les hauts plateaux malgaches : Manankazo. C.I.G.R. Florence : 16 p.
- 2.8. Goujon (P.), Bailly (G.), 1974 : Aménagements antiérosifs et économie de l'eau. XIII Journées de l'Hydraulique, Paris : 7 p.
- 2.9. Bailly (G.), Coignac (B. de), Malvos (C.), Ningre (J.), Sarrailh (J.), 1974. Influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentations en bassins versants. Cah. Scientifiques CTFT n° 4, 114 p.
- 2.10. CTFT, 1975 : Parcelles d'érosion de Nanisana, 22 p. multigr.
- 2.11. CTFT, 1978 : Bassins versants à Madagascar. Bilan de l'eau sous prairies naturelles et artificielles. Compte-rendu de fin d'expérimentation. CTFT/DGRST : 55 p. + Ann.
- 2.12. Roose (E.), Bertrand (R.), 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt. Agron. Trop. 26, 11 : 1270-1283.
- 2.13. Roose (E.J.), 1973. Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire. Thèse Fac. Sciences Abidjan n° 20 : 125 p. Multigr. ORSTOM, Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 78.

- 2.14. Roose (E.J.), 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. Agron. Trop., 32, 2 : 132-140.
- 2.15. Roose (E.J.), 1980 : Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et Documents ORSTOM n° 130. Thèse Univ. Orléans : 587 p.
- 2.16. Ibiza (D.), 1975 et 76 : Bilan hydrique sous prairies naturelles et artificielles. Bassins versants expérimentaux de Ambatomainty Campagnes 1973-74 et 1974-75. ORSTOM/DGRST Paris 65 et 47 p. multigr.
- 2.17. Wischmeier (W.H.), Johnson (C.B.), Cross (B.V.), 1971 : A soil erodibility NOMOGRAPH for farmland and construction sites. J. of Soil and Water Conservation 26, 5 : 189-192.
- 2.18. Wischmeier (W.H.), Smith (D.D.), 1978 : Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agriculture handbook n° 537, 58 p.

### **3. Etude des lavakas :**

- 3.1. Riquier (J.), 1954 : Etude des lavakas. Mémoire IRSM Série D, Tome 6 : 169-189.
- 3.2. Rougerie (G.), 1965 : Les lavakas dans l'évolution des versants à Madagascar. Bull. Assoc. Géogr. Franc. n° 332 : 15-28.
- 3.3. Petit (M.), Bourgeat (F.), 1965 : Les lavakas malgaches. Un agent naturel d'évolution des versants. Bull. Assoc. Géogr. Fr., 332 : 29-33.
- 3.4. Le Bourdieu (P.), 1966 : Remarques sur l'évolution des versants à Madagascar. Rev. Géogr. Madagascar, 9 : 269-273.
- 3.5. Heusch (B.), 1981 : Les lavakas du lac Alaotra (Madagascar). Sém. Nat. "La gestion régionale des sédiments". Propiano, mai 1981 : 5 p.

#### 4. Problèmes de fertilisation sous culture et sous forêt

- 4.1. Arrivets (J.) *et al.*, 1980 : Systèmes de fumure des hautes terres. Ampangabe, campagne 1978-79. Cenraderu - IRAT : 19 p. + ann.
- 4.2. Arrivets (J.), Rabetrano (A.), Rakoto Andrianihamina (J.), 1979 : Fertilisation des tanety de la région de Tananarive. C.R. expérimentation 1977-78 sur maïs. Cenraderu - IRAT : 28 p. + ann.
- 4.3. Arrivets (J.), Ravoaty (R.), 1981 : Politique de la fertilisation agricole à Madagascar. Cenraderu , 15 p. multigr.
- 4.4. Arrivets (J.), Razafindrakoto (J.), 1980 : Systèmes de fumures. Reprise de l'expérimentation sur la fumure du manioc. Ampangabe, 1976-78. Cenraderu - IRAT, 19 p. multigr. + ann.
- 4.5. Arrivets (J.), Razafimahefa (R.) *et al.*, 1980 : Système de fumure sur les hautes terres. C.R. Expérimentation 1978-79 sur l'arachide dans la région de Tananarive. Cenraderu, 33 p. + ann.
- 4.6. Arrivets (J.), Rakotodriaminamina (J.) *et al.*, 1978 : Systèmes de fumure. C.R. expérimentation 1976-77 avec première synthèse des résultats 1974-77 dans la région de Tananarive : 40 p. + ann.
- 4.7. Malvos (C.), 1980 : Rôle du potassium et du phosphore sur la croissance des reboisements de *Pinus kesiya* à Madagascar. Thèse Docteur Ing. Nancy I, 134 p. + Annexes.
- 4.8. Malvos (C.), Bailly (G.), 1980 : Expérimentations réalisées à Madagascar sur la fertilisation des Pins après plantation. Cahiers scientifiques CTFT n° 5, Paris : 108 p.

#### 5. Les sols :

- 5.1. Langellier (P.), Bouchard (L.), 1973 : Etude pédo-agronomique de la station d'Ambatomainy. Doc. 386 IRAM : 27 p. + ann.

- 5.2. Raunet (M.), 1980 : Les bas-fonds et plaines alluviales des hautes-terres de Madagascar. Reconnaissance morphopédologique et hydrologique. Aptitude à la culture du blé de contre-saison. IRAT Paris : 166 p. multigr.
- 5.3. Bourgeat (F.), 1972 : Sols sur socle ancien à Madagascar. Mémoire ORSTOM n° 67 : 335 p.

## **ANNEXE 2 - Programme de la mission :**

- 21/04/82** Départ d'Orléans et instructions de M. REY à Paris
- 22/04/82** Arrivée à Tananarive : contact avec la Dinika. Contact avec :  
- Mrs Rakotomaniraka Jean, son directeur,  
- Rakotobe, le coordinateur Dinika/Scet  
- Enaud, hydrologue IGREF de la Scet
- 23/04/82** Contact avec : - M. Rabeson, agronome consultant,  
- Randrianari Joana, forestier, consultant D.R.S.
- 24/04/82** Tournée sur le terrain au Lac Mantasoa, à l'est de Tana.  
Premières observations :  
- sur les sols, l'enracinement des Pins et Eucalyptus,  
- sur les reboisements, l'activité de la mésofaune,  
- sur les litières forestières.
- 25/04/82** Contact avec M. Bauduin, hydrologue ORSTOM.
- 26/04/82** FOFIFA, contact avec :  
- M. Ratsimbafy Claude, directeur de la recherche agronomique.  
- M. Rakotomananpison, chef du Centre de la recherche forestière et piscicole,  
- M. Rakotomanana, J. L., Chef de la division Sol.  
Après-midi, tournée vers le Sud Est, route de Tulear, jusqu'au point de Ambatofotsy sur la Sisaony, puis piste vers l'Est avec M. Randrianarisoana.
- 27/04/82** Matin : documentation à la Dinika.  
Après-midi : Fofifa. Discussion avec M. Rakotomanana sur la D.R.S.
- 28/04/82** Documentation à la Dinika.

- 29/04/82** Matin : Fofifa, réunion avec le CTFT :  
- M. Louppe, sylviculture,  
- M. Verhaegen, généticien,  
- M. Lefevre, technicien.  
Après-midi, avec M. RandrianariJoana, discussion sur le document de synthèse des essais DRS déjà publiés.
- 30/04/82** Matin : Fofifa :  
- M. Louppe  
- M. Andrianirina Gervais, chef division sylviculture.  
Après-midi : documentation + discussion avec Rakitomanana.
- 1er mai** Visite des bassins de Manankazo, 130 km au Nord, route de Majunga avec M. Rakotomunana et Jean Ndriambara, chef de Station.
- 02/05/82** Contact avec D. Bauduin.
- 03/05/82** Matin : Fofifa, discussion avec M. Guiss, de l'IRAT.  
Après-midi : discussion document synthèse avec M. Randrianarijoana.
- 04/05/82** Matin : contact avec le Laboratoire des Radioisotopes :  
- Mme Robertine Raharinusy ..... phosphore marqué  
- M. Dupuis, chef de laboratoire ..... azote 15  
Après-midi : documentation Dinika
- 05/05/82** Matin : documentation  
Après-midi : discussion document synthèse avec M. Randrianarijuana
- 06/05/82** Visite des deux bassins 30 ha de Ambatomainty, 130 km S.E. de Tana en bordure de la falaise, avec M. Rakotomanana.
- 07/05/82** Visite de la station de Ampangabe avec M. Guiss (IRAT) :  
- 6 parcelles d'érosion  
- 16 + 12 lysimètres (Arrivets)  
- divers essais de fumure minérale en appoint à fumure organique  
- collection de plantes fourragères  
Après midi : discussion, texte de synthèse avec M. Randrianarijoana
- 08/05/82** Visite de la région du lac Itasy avec M. Enaud, 140 km à l'Ouest de Tana, sols volcaniques, lavaka
- 09/05/82** Contact avec M. Bauduin
- 10/05/82** Matin : rédaction premier schéma de rapport.

Après-midi : exposé devant les forestiers du FOFIFA de ce premier schéma, puis critique des idées : situation sur fortes pentes des forêts + fertilisation indispensable pour assurer une réussite tout en préservant les terres peu pentues pour la pâture et l'extension future de l'agriculture.

- 11/05/82** Matin : passage de la parcelle au bassin versant avec M. Bauduin  
Après-midi : discussion infiltration longue durée et comportement hydrique des sols et lysimètres type Roose avec Olivier Jourdan du laboratoire des radioisotopes.
- 12/05/82** Rédaction du rapport  
Soir : contact avec M. Ratsimbazafy et M. Colouma (physiologiste ORSTOM détaché à l'université).
- 13/05/82** Rédaction du rapport et remise au directeur de la Dinika, puis à M. Rahès pour critiques avant la frappe.  
- 21 h 15 : décollage.
- 14/05/82** - 14 h : arrivée au domicile à Orléans.

### **ANNEXE 3 - Problèmes à approfondir :**

#### **3.1. Erodibilité des sols :**

La résistance du sol, du fait de ses propriétés intrinsèques, à l'énergie développée par la battance des gouttes de pluie (érosion en nappe), est appelée érodibilité du sol. Pour la mesurer, Wischmeier a défini des conditions standards (= la parcelle nue de référence, non encroûtée, travaillée chaque année, dans le sens de la pente, sans aucun apport de matières organiques pendant trois ans, de 22,2 mètres de long et 9 % de pente). Dans ces conditions, le facteur K (= érodibilité du sol) est égal au rapport des terres érodées sur l'indice d'agressivité des pluies à un facteur près (passage des unités anglaises aux unités décimales). K varie de 0,01 à 0,70 aux USA lorsque les sols sont de plus en plus érodibles.

Sur les sols ferrallitiques de Madagascar, K mesuré sur des parcelles de référence varie de 0,001 à 0,30 dans l'espace et dans le temps. Remarquons tout d'abord que contrairement à certaines habitudes à Madagascar et en Tunisie, Wischmeier se base sur l'indice moyen (à partir de la troisième année) pour classer les sols et non sur l'indice maximal atteint sur une parcelle. Nous suggérons de retenir l'indice K normal plutôt que

moyen pour tenir compte de l'indice le plus fréquemment observé plutôt que de tenir compte des fortes variations (en moins les premières années et en plus s'il y a des erreurs d'observation ou de manipulation). Dans ce cas, K normal varie de 0,01 à 0,24 et les sols peuvent être classés en très résistants (0,01 à 0,10), assez résistants (0,10 à 0,20), moyennement érodibles (0,20 à 0,40).

Wischmeier et ses collaborateurs ont publié un nomographe (1971) permettant d'évaluer K à partir de l'analyse des teneurs en matières organiques et de la texture, et d'une estimation de la perméabilité et de la structure du profil.

Dès 1976, nous lui avons suggéré différentes améliorations tenant compte du taux d'éléments grossiers pierreux dans l'horizon labourable (Dumas, 1966 ; Roose, 1976) et du taux de fer libre et de sodium. A Madagascar, il faudrait **profiter des résultats existants pour vérifier ou améliorer le nomographe proposé par Wischmeier** pour prévoir l'érodibilité des sols à partir des cartes pédologiques existantes.

Il n'est pas inutile de rappeler que cet indice d'érodibilité des sols ne concerne que la résistance à **l'érosion en nappe** et ne s'applique donc pas à **l'érosion en ravine** ou **aux lavakas**. Comme les lavakas sont la source principale de sédiments, un gros effort reste à fournir pour étudier la **résistance des terrains** (sol + altération des roches x pentes et couvert végétal) à **l'érosion en lavakas**. Ceci pourrait dans un premier temps, se limiter à une **enquête** sur la présence et sur le développement des lavakas en fonction des conditions géologiques, pédologiques, géomorphologiques et botaniques, climatiques, écologiques et topographiques (**corrélations multiples**). Dans un deuxième temps, il faudrait définir les moyens de stabiliser et mettre en valeur ces pentes concaves qui drainent la nappe phréatique.

L'étude de l'érodibilité des sols au niveau des toposéquences (proximité des niveaux d'altération) et du sous-sol présenterait un intérêt évident pour les services chargés des aménagements à l'échelle des bassins versants.

En vue de la protection des terres contre les lavakas, il est indispensable d'étudier **l'origine et la cause des lavakas**. Les lavakas ne sont-elles que la suite naturelle de l'érosion en nappe évoluant en rigoles, puis en ravine particulière (du fait de la structure et de l'épaisseur des sols et des matériaux altérés) ? (Riquier, Heusch). Dans ce cas, en traitant l'érosion en nappe, on arrête la formation de nouvelles lavakas. Ou bien les lavakas tirent-elles leur origine d'autres processus (glissement, suffosion, etc...), et dans ce cas, quelles sont les techniques à mettre en oeuvre pour réduire les risques de leur apparition sur de vastes étendues ?

### 3.2. Sylviculture forestière.

On sait les inconvénients des plantations équiennes monospécifiques sur le potentiel de production des terres en Europe. Or, sur les hauts plateaux malgaches, les espèces préconisées pour les plantations sur de larges étendues, sont extrêmement limitées : deux ou trois espèces de *Pinus* et deux espèces d'*Eucalyptus* qui ont donné de bons résultats sur ces sols extrêmement pauvres chimiquement. Il nous semble donc urgent de reprendre le problème de l'acclimatation d'espèces étrangères ou locales, en tenant mieux compte de **l'origine des semences, des conditions écologiques locales** (vent, froids, sécheresse pendant cinq mois) et des **possibilités de fertilisation** pour établir le manteau forestier et son système racinaire profond. De plus, une sélection massale des meilleurs sujets rencontrés dans les peuplements existants pourrait améliorer substantiellement la qualité des produits et même leur quantité.

Les *Pinus* donnent, dès la huitième année, une litière protégeant parfaitement le sol contre l'érosion et stockant l'eau comme une éponge ; par contre, ces peuplements sont très sensibles aux feux de brousse. Les eucalyptus laissent souvent un tapis herbacé se développer sous eux, ce qui peut favoriser le passage des feux (auxquels ils sont plus résistants que les *Pinus*) ; leur litière est souvent discontinue et en "tuile" plutôt qu'en "éponge", si bien qu'elle protège moins bien le sol contre le ruissellement. Les Pins donnent souvent du bois d'œuvre de bonne qualité tandis que les *Eucalyptus* fournissent très vite du bon bois de chauffage. Il semblerait donc utile **d'associer ces deux essences** de lumière par bouquets, les Pins occupant le centre du massif, les eucalyptus protégeant le pourtour contre les feux. Des essences précieuses ou des essences secondaires améliorant la qualité de la litière pourraient trouver leur place. Des essences fruitières pourraient aussi servir de rempart aux forêts.

Le problème des feux de brousse reste préoccupant. Les ébranchages et le désherbage du pourtour des arbres pourraient aider à en réduire les inconvénients. Mais il est nécessaire d'aborder le problème de points de vue plus fondamentaux (psychologique, éducatif, économique). Si chacun était personnellement concerné par les bosquets que constituent le paysage et offrent des moyens de subsistance, le problème des feux serait moins aigu : cela nous a paru le cas dans la région du lac Mantasoa où la couverture forestière occupe 70 % du terrain et fournit du travail et des revenus à une part non négligeable de la population.

Par ailleurs, le travail du sol (griffage en vue de la régénération naturelle, soussolage ou labour superficiel, terrasses individuelles pour augmenter le stock d'eau disponible dans le sol) offre un champ d'investigation qui est loin d'être couvert, surtout en position de forte pente. L'enracinement superficiel trouve-t-il sa raison d'être dans une barrière chimique ou aussi dans des horizons compactés, moins poreux, plus imperméables comme en Amérique latine hyperhumide (ex. Guyane française) ?

Un effort de vulgarisation d'outils mieux adaptés aux travaux sur les tanety que l'angady, tels que différents modèles de houe, daba mossi qui sert au sarclage et à l'ébranchage, matchette ou faux pourraient aussi améliorer les conditions de travail.

Enfin la fertilisation minérale (dose, fractionnement, date) mériterait d'être précisée en fonction des différentes espèces forestières et des associations diverses avec des taillis fourragers ou des légumineuses fixatrices d'azote.

### **3.3. Problèmes agronomiques.**

Après avoir démontré que les sols de tanety sont capables de donner d'excellents rendements **moyennant des fumures de fond importantes** (dolomie, P et K) et des fumures d'entretien fonction des cultures et des rendements escomptés, les travaux de l'IRAM et du CENRADERU se sont attachés à définir les **compléments minéraux minima** nécessaires à **une fumure organique** disponible en petite quantité. Les travaux devraient maintenant porter sur l'analyse des différentes **méthodes d'aménagement des résidus de culture combinés au travail du sol** (mulching tillage), à l'utilisation optimale de toutes les déjections animales et humaines, **aux cultures associées** (céréales, légumineuses et féculents) et à l'installation de la prairie temporaire (durée 2,5 ans) dans les cultures de fin de cycle (pomme de terre ou soja ou autre plante à cycle de trois mois) vers janvier (*Stylosanthes gracilis* ou *Desmodium intortum*, Pois d'Angole, selon l'altitude). Le sarclage chimique étant actuellement hors de portée, il serait utile d'étudier l'abondance des mauvaises herbes, leur dynamique et leur influence sur les rendements en fonction des différentes plantes cultivées.

### 3.4. Problèmes d'échelle sur les transports solides et les débits de pointe de crue

**Débit solide :** On a vu que sous prairie brûlée tous les 2-3 ans, l'érosion décroît en fonction de la taille du bassin : 3 t/ha/2 ans sur parcelles de 200 m<sup>2</sup>, 0,3 t/ha sur bassin de 4 ha et 0,03 t/ha/an sur bassin de 30 ha. Qu'en est-il sur des bassins de 100-500-45.000 km<sup>2</sup> ? Notons qu'aucune lavaka n'était comprise dans les trois premières échelles étudiées ; il est probable que la charge solide augmente sérieusement à partir d'une taille de bassins intégrant de nombreuses ravines et cette augmentation varie probablement de façon irrégulière (seuils de débits de crue, etc...). De plus, l'aménagement des rizières (drainages et maîtrise de l'eau) influe certainement sur les débits liquides et solides (à préciser). Il serait très instructif d'effectuer périodiquement des prélèvements de charge solide, les débits étant mesurés simultanément, en différents points du bassin pour localiser l'origine de la charge solide (en nappe, lavakas, fonds ou berges de rivière divagante, routes, travaux du génie rural).

**Débit max. de crue, débit de base et temps de concentration :** Les observations de Manankazo montrent qu'une plantation de Pins peut réduire le débit max. de crue de fréquence 1/100 ans à moins de 10 % de celui d'une prairie brûlée tous les deux ans. Mais nous ignorons presque tout du **devenir de l'eau supplémentaire infiltrée**. L'évapotranspiration peut augmenter de 100 à 200 mm ; mais le reste va rejoindre la nappe et de là, va être redistribué avec un certain délai à la rivière. La comparaison des deux bassins de 30 ha de Ambatomainty montre que le bassin "aménagé" semble évaporer plus que le témoin (prairie en défens) (variation de 5 à 10 % en trois ans mais dans le même sens) : on ignore cependant quelle peut être l'influence de chaque partie de l'aménagement (la forêt, la culture, la rizière). Il faudrait au moins autant de bassins que d'inconnues pour résoudre l'équation. En particulier, il serait souhaitable de recueillir des informations sur l'influence de l'écoulement en fonction de l'aménagement, sur l'influence du **taux de boisement** des bassins, de la **situation des boisements** dans le paysage (bas de pente, haut de pente et plateau ou pentes supérieures à 25 %) et du **type de boisement** (pin ou Eucalyptus, mode de plantation, de travail du sol, de fertilisation, densité, races, origines des semences, mode d'exploitation, futaies ou taillis, etc...). L'étude détaillée des principales crues des principaux affluents de l'Ikopa permettrait déjà de se faire une idée plus précise de l'importance relative du ruissellement et des débits de base dans les débits max. de crue de fréquence inférieure à 1/20 ans ainsi que des temps de concentration.

Enfin, il reste à préciser comment l'excédent d'infiltration observé sous forêt va se répercuter sur les **débits d'étiage** utilisables pour l'irrigation des vallées et de la plaine. Plusieurs de ces problèmes pourraient être abordés hors de l'aménagement de la Sisaony.

### **3.5. Petits barrages collinaires en terre.**

De nombreux arguments militent en faveur de la création de nombreux petits barrages collinaires en tête de vallon dans les zones tourbeuses peu aptes à la riziculture. La tourbe pourrait être utilisée sur les cultures maraîchères des terrasses voisines. La réserve d'eau serait très utile pour la pisciculture (tilapias et carpes) et pour assurer la première irrigation nécessaire avant le semis dès les premières pluies. S'ils sont astucieusement aménagés (capable d'être vidés au 2/3), ils peuvent participer d'une façon modeste au laminage des plus fortes crues : lachage des 2/3 de la réserve à l'annonce d'un cyclone et remplissage au cas où la cote d'alerte est atteinte dans la plaine. Ces barrages de tête de vallée jouent un rôle important aux USA dans la conservation des terres et la limitation de la charge solide des rivières : ils retiennent le majorité des sédiments sableux à proximité de leur source.

Dans le cas des hauts plateaux malgaches, l'évapotranspiration potentielle est limitée par la baisse de la température en saison sèche ( $\pm 50$  cm) : ces petits barrages de faible profondeur (2-5 mètres) sont capables de retenir assez d'eau pour permettre d'arroser et de semer précocement les rizières et d'éviter qu'elles souffrent d'inondations précoces.

### **3.6. Coût des opérations.**

Nous n'avons pas eu l'occasion d'approfondir cette question. Disons seulement que nous avons relevé dans une étude récente de Heusch (1980), au lac Alaoutra, des coûts de reforestation (pépinières, soussolage à 2,5 m de distance + pistes d'accès et plantations) variant de 45 à 100.000 FMC de l'époque. La méthode de plantation entièrement manuelle (sans soussolage, mais terrasses individuelles plus fertilisation) devrait réduire le coût à 40.000 FMC environ et si l'on évite la pépinière en semant directement sur le terrain, on devrait atteindre un coût de 25.000 FMC/ha en comptant sur la participation des collectivités locales encadrées par les Agents de l'Etat.