

Relations entre le relief, les types de sols, et leurs aptitudes culturales sur les hautes terres malgaches

F. BOURGEAT et C. ZEBROWSKI

*Pédologues de l'ORSTOM
Tananarive (Rép. malgache)*

HUYNH VAN NHAN

*F. VICARIOT
Agronomes de l'ORSTOM
Tananarive (Rép. malgache)*

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la mise en valeur des terres des hauts plateaux malgaches, les relations entre les rendements et le type de sol ont été étudiées. Dans ce même cadre on a tenté de dégager les unités morphologiques, définies tant par leur modelé que par les types de sol rencontrés, et affectées chacune d'un niveau de production déterminé.

La première partie est un rappel de la classification des sols rencontrés sur les plateaux malgaches, et de leurs propriétés physiques.

La deuxième partie présente le milieu physique des zones étudiées et définit les unités morphologiques dans chaque zone.

Enfin, dans la troisième partie, l'analyse des rendements de 81 parcelles plantées en maïs permet de montrer que :

— Il existe dans la plupart des cas des différences significatives entre les rendements obtenus sur chaque type de sol. Les variations observées dépendent essentiellement des différences entre les propriétés physiques de ces divers types de sol ;

— Il est possible de délimiter des unités morphologiques (ou modelés) affectées d'un seuil de production déterminé. Les variations de rendement entre ces unités sont moins importantes que celles entre types de sol, mais encore hautement significatives.

Il ressort en particulier de cette étude que les meilleurs rendements sont obtenus dans des zones à relief accidenté. Cette observation entre en contradiction avec la priorité accordée habituellement à l'aménagement des zones planes.

ABSTRACT

The connection between the yields and the different sorts of soil has been studied to get a better development from the highlands of Madagascar. Morphological units have been defined, too, by their shape and their soil ; and each of them has a particular level of production.

The first part is the classification of the soils, one can find on the highlands of Madagascar, and their physical characteristics.

The second one is the physical environment of these very areas, and the morphological units in each of them.

The last one is the analysis of the yields of 81 Maize-patches. It shows that most cases, there are significative

differences between the yields got from different soils. The variations depend essentially on the differences of the physical properties.

It shows too, that it is possible to delimitate morphological units (or reliefs) having a threshold of a certain production. Between these units, the variations of the yield are less important than those between the different soils, but nevertheless still very significative.

To conclude we shall say that we get the best yields from an hilly relief. This remark is just the opposite of the usual one which gives the priority for the aménagement on flat lands.

INTRODUCTION.

Dans le cadre des interventions visant au développement agricole des Hauts-Plateaux malgaches, à l'O.P.R. (Opération productivité rizicole) a succédé l'opération « Tanety »¹.

Le but de cette dernière, réalisée sous l'égide du Ministère de l'Agriculture dans le cadre de l'U.R.E.R.² de Tananarive, est la mise en culture rationnelle des terres de « Tanety ».

La vulgarisation par action de masse poursuivait par là trois objectifs fondamentaux :

- associer agriculture et élevage ;
- intensifier les systèmes de production existant sur « Tanety » ;
- procurer aux paysans des revenus significatifs.

Dans ce sens, et suite aux différents essais réalisés auparavant, les responsables de la vulgarisation ont imaginé un système de mise en valeur rationnelle et intensive faisant appel à la notion de rotation.

Ce système repose sur le principe d'un schéma de culture appelé « Secteur modernisé de cultures sèches » ou « S.M.C.S. ». Le schéma type comprend 3 soles de cultures vivrières et 3 soles de prairies. Pour des raisons matérielles et psychologiques chaque sole occupe une superficie d'environ 10 ares mais les paysans peuvent opter pour des schémas simplifiés : la sole élémentaire de 10 ares ou 3 soles de cultures vivrières sans prairie.

¹ Tanety : terres sur relief de collines des Hauts-Plateaux.

² U.R.E.R. : Unité Régionale d'Expansion Rurale.

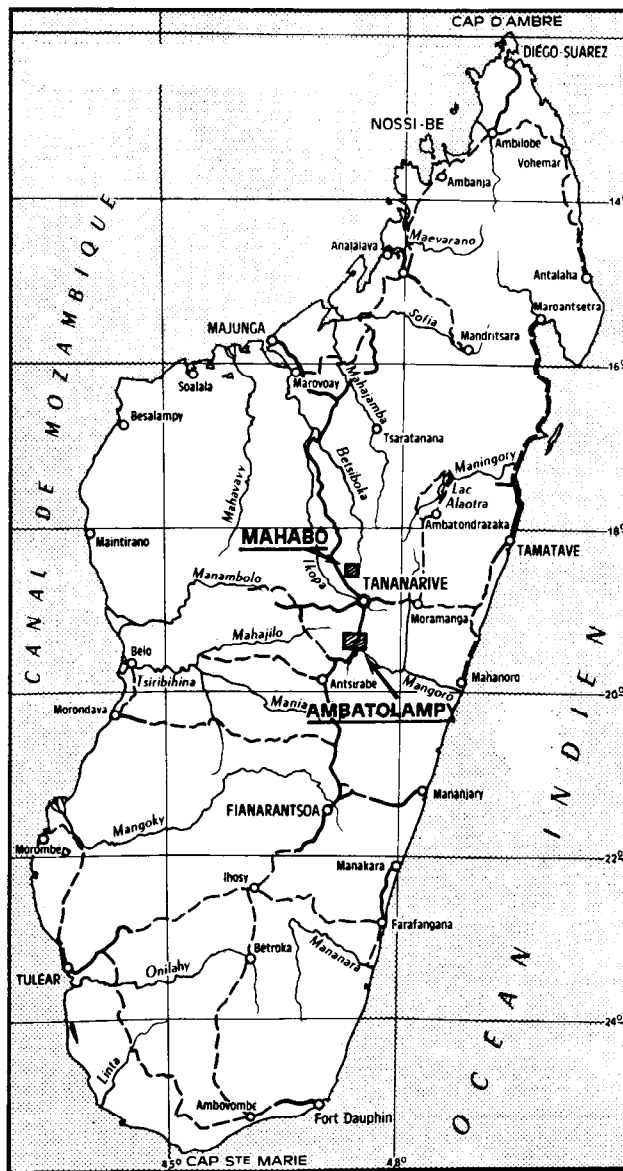


Fig. 1. — Carte de situation.

Dans la majorité des cas, et en particulier ceux dont il est fait mention dans cette étude, les schémas adoptés et réalisés sont de 60 ares, soit les 6 soles citées plus haut.

A la suite de plusieurs années d'expérimentation, l'I.R.A.M.¹ a montré que sur Tanety, il était nécessaire :

¹ I.R.A.M. : Institut de Recherche Agronomique de Madagascar.

- de redresser la fertilité du sol par une fumure minérale de redressement ;
- de maintenir cette fertilité par des fumures d'entretien¹.

Devant les coûts élevés de cette fumure minérale et les faibles niveaux de la trésorerie des exploitations familiales de la région, les responsables de l'U.R.E.R. ont opté pour une voie moyenne et retenu le principe d'une fumure mixte : minérale et organique. Le coût de la fumure est abaissé et l'investissement monétaire passe alors de 29 000 FMG/ha à 16 500 FMG/ha.

A partir des essais de l'I.R.A.M. et des résultats obtenus en 1967-68 chez un certain nombre de paysans, la fertilisation ainsi appliquée devrait, selon l'U.R.E.R., permettre d'escompter à la première rotation les rendements moyens suivants :

Maïs :	2,8 t/ha
Tabac :	1,4 »
Pomme de terre :	10 »
Haricot :	1 »
Manioc :	15 »
Soja :	0,8 »
Voanjobory :	1,2 »
Patate :	8 »
Arachide :	1,5 »
Prairie (vert) :	25 »

En 1969, les différents thèmes techniques relatifs aux S.M.C.S. sont passés en vulgarisation de masse et parallèlement a été confié aux agronomes de l'O.R.S.T.O.M. le soin d'évaluer, par observation continue d'un certain nombre de schémas, les résultats obtenus par les paysans. La méthode utilisée fut celle du « suivi agro-économique » des exploitations touchées par la vulgarisation. Elle consiste, entre autres, à évaluer par observation directe et sondage au niveau des parcelles, les rendements, leur variabilité et les causes de cette variabilité.

L'analyse des rendements et des différents facteurs de production, hormis le facteur sol, montrait qu'une part importante de la variabilité restait inexplicée, bien que la gamme des rendements se situât entre 0,900 t/ha et plus de 7 t/ha. Il apparaissait donc intéressant et possible aujourd'hui, grâce à l'étude de F. BOURGEAT sur les sols ferrallitiques, d'intégrer le sol dans l'inventaire et l'analyse des facteurs de production.

La présente note a trait à l'examen des relations entre types de modelés, types de sols et aptitudes culturales appréciées à travers le maïs. Elle gagnera à être complétée par l'analyse du comportement des autres cultures de l'assolement, but que nous nous proposons de suivre ultérieurement.

¹ Travaux I.R.A.M. : « Colloque sur la fertilité des sols tropicaux », Tananarive, 1967.

Cette étude comprendra trois parties. La première sera consacrée à un rappel sur la classification des sols ferrallitiques¹, la seconde à une présentation générale du milieu physique dans les régions de Mahabo et d'Ambatolampy qui constituent le cadre de notre travail ; la troisième sera réservée à l'étude des corrélations qui sont susceptibles d'exister entre les rendements, d'une part, les types de sols et le modelé général d'autre part. En effet, il a été montré que la répartition des différents types de sols est étroitement liée au modelé, donc à l'histoire des reliefs qu'ils recouvrent (F. BOURGEAT, 1970). Sur chaque type de relief bien caractérisé existe un type de sol (ou des associations) bien défini. Il apparaissait donc logique de vérifier si l'on pouvait attribuer, à chaque unité régionale, déterminée par sa structure géologique et son modelé, un niveau de production ou des aptitudes culturales données, voire optima.

Enfin, en conclusion, nous insisterons plus spécialement sur l'importance que revêt une étude synthétique du milieu physique pour une exploitation intensive des « Tanety » dans l'Imerina Central.

Si nous avons retenu comme plante test le maïs, c'est parce que celui-ci se trouve en tête d'assolement ; son rendement n'est alors pas affecté par les précédents culturaux (restitutions végétales, arrière effet des fumures). De plus cette plante est peu sensible aux maladies et peu attaquée par les insectes ou autres parasites².

1. RAPPEL SUR LES PROPRIÉTÉS ET LA CLASSIFICATION DES SOLS FERRALLITIQUES

Nous ne précisons ici que les caractères concernant les sols observés dans les régions d'Ambatolampy et de Mahabo en insistant surtout sur les types qui ont été mis en culture. Les sols ferrallitiques s'y subdivisent en deux sous-classes et en plusieurs groupes et sous-groupes.

1.1. DÉFINITION ET CARACTÉRISATION DES SOUS-CLASSES.

1.1.1. La sous-classe des sols pénévolués (ou fortement rajeunis).

Ces sols sont situés sur des pentes fortes qui peuvent dépasser 45%. Leur caractéristique principale réside

¹ Une étude générale des sols ferrallitiques formés sur socle cristallin a été présentée par l'un d'entre nous (F. BOURGEAT, 1970). Le même auteur a établi, en collaboration avec G. AUBERT (F. BOURGEAT, G. AUBERT, 1971) une classification de ces sols basés essentiellement sur leurs processus d'évolution et leurs propriétés physiques. Par ailleurs, C. ZEBROWSKI fait actuellement un travail de synthèse pour les sols dérivés des roches volcaniques.

² En cas d'attaque assez fréquente au moment de la levée par des larves de coléoptères (*Heteronichus* principalement) les paysans remédient par des resemis qu'il est facile de déceler et d'éliminer lors des sondages de rendements.

dans la présence, à faible profondeur (en général à moins de 60 cm) d'un horizon limoneux (ou argilo-limoneux) où l'on reconnaît des minéraux primaires. On passe très rapidement vers 1 m - 1,50 m, à l'horizon d'altération (zone de départ) où la structure de la roche mère est conservée. Le teneur en limons est élevée dès la surface¹.

Sur roches basiques la structure est bien développée, le degré de structuration est élevé et les agrégats plus ou moins cohérents. Sur roches acides les agrégats, de taille moyenne, sont peu individualisés mais sont très poreux.

Ces sols sont bien représentés dans les zones étudiées. Sur roches acides ils sont très susceptibles à l'érosion et ne sont généralement pas mis en culture. Sur roches volcaniques ils sont souvent situés sur des pentes moins fortes, ils sont moins érodables et sont cultivés.

1.1.2. La sous-classe des sols rajeunis.

Les sols rajeunis sont situés sur des pentes beaucoup moins marquées, qui dépassent rarement 20 à 30%. On note ici l'existence, à profondeur moyenne (le plus souvent entre 60 cm et 2 m), d'un horizon BC argileux à argilo-limoneux qui contient des minéraux primaires altérables. L'horizon d'altération (C) se situe toujours au-dessous de 1,50 m. Les horizons supérieurs ont une teneur élevée en argile et un faible pourcentage de limons².

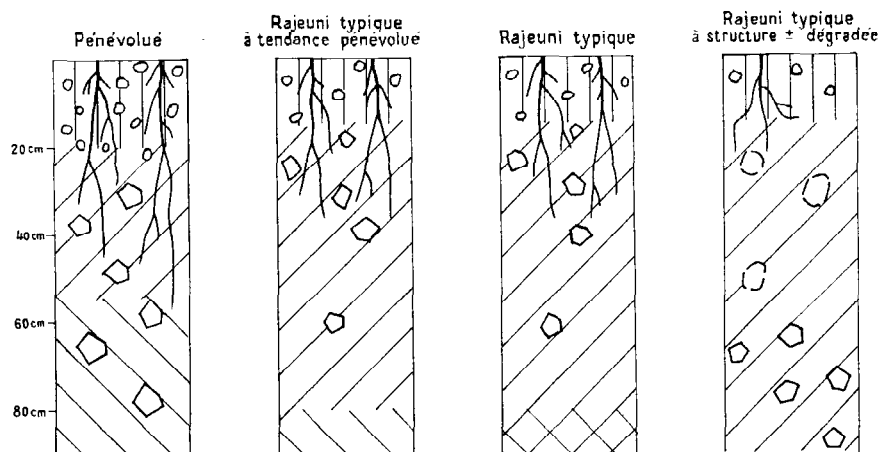
Les sols ferrallitiques rajeunis sont tous désaturés, pauvres du point de vue chimique ; mais le mode et le degré de structuration sont très variables. La mise en valeur de ces sols est essentiellement conditionnée par leurs propriétés physiques. En effet, l'amélioration d'un sol à structure dégradée est souvent longue, incertaine et onéreuse. Par contre, la correction des carences chimiques peut facilement être faite par l'apport d'engrais, à condition évidemment que l'on puisse envisager une production qui couvre largement le prix de la fumure ; il s'agit là d'un problème économique important qui ne peut malheureusement pas être abordé dans le cadre de cet article.

1.2. DÉFINITION DES GROUPES ET DES SOUS-GROUPES.

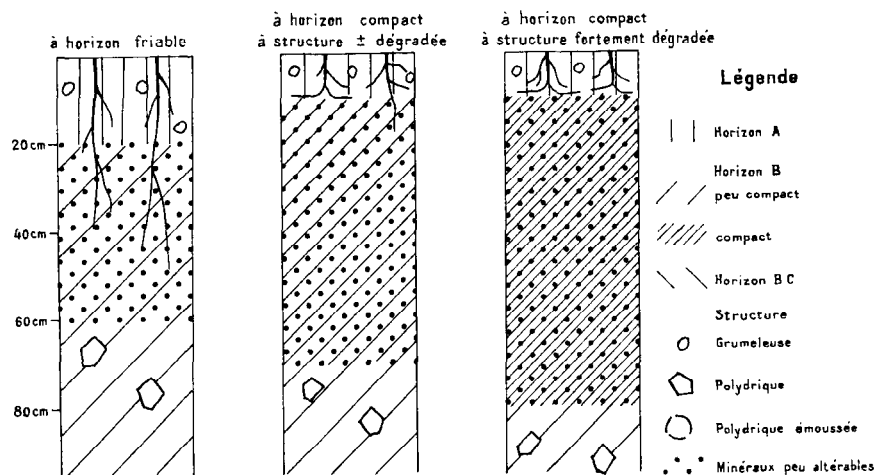
La définition des groupes est basée sur les processus d'évolution : enrichissement en minéraux peu altérables, appauvrissement, processus d'hydromorphie, remaniement. Ces distinctions paraissent intéressantes car elles conduisent à l'individualisation de niveaux pédologiques qui sont caractérisés par des propriétés physiques variables.

Il nous est apparu cependant très difficile de tenir

- | | |
|---|---|
| 1 | Le rapport $\frac{\text{limons altérables et de néoformation}}{\text{argile}}$ dépasse 0,2. |
| 2 | Le rapport $\frac{\text{limons altérables et de néoformation}}{\text{argile}}$ est inférieur à 0,2 sur une profondeur de 60 cm. |



Schémas des profils des sols ferralliques.



Sols rajeunis enrichis en minéraux peu altérables.

Fig. 2.

compte du remaniement des sols. En effet, les « stone-line » observées dans les sols ferrallitiques de Madagascar sont généralement discontinues, et il n'est pas rare d'observer sur une même parcelle une juxtaposition complexe des sols remaniés à « stone-line » et de sols sans horizon grossier. Dans certaines fosses pédologiques, nous avons même pu remarquer la discontinuité de l'horizon grossier qui n'apparaissait que sur une partie de la coupe.

Les critères retenus pour définir les sous-groupes ont trait à des processus d'évolution peu marqués, à l'état du complexe, et à la structure des différents horizons. Ce dernier critère est apparu, à la suite de nos observations, le plus intéressant et il conviendrait de le

faire figurer à un niveau plus élevé de la classification car il permet de mieux préciser l'aptitude des sols.

1.3. LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS CULTIVÉS.

1.3.1. Les sols pénévolués typiques.

1.3.1.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Les sols bruns, développés sur roches basiques, sont les seuls à être cultivés. Ils ont d'excellentes propriétés physiques, le degré de structuration est élevé. La teneur

en argile atteint 65% en surface, mais diminue rapidement en profondeur¹. Le complexe absorbant est toujours désaturé.

1.3.1.2. Examen du profil cultural.

L'horizon humifère est épais, la structure est grumeleuse à polyédrique émousée. Le degré de structuration est élevé, la porosité est forte. Le passage avec l'horizon inférieur est progressif. Dans l'horizon B de couleur brune la structure est toujours très bien marquée mais plus fermée que dans l'horizon humifère ; la porosité reste bonne. Les racines sont nombreuses et pénètrent bien dans le profil, leur densité diminue progressivement en profondeur.

1.3.1.4. Aptitude et mise en culture.

La mise en culture de ces sols est intéressante ; ils ont en effet d'excellentes propriétés physiques et sont peu sensibles à l'érosion par suite de leurs teneurs relativement élevées en argile. L'apport d'engrais se révèle très bénéfique.

1.3.2. Les sols rajeunis typiques à tendance pénervoluée.

1.3.2.1. Caractéristiques pédologiques principales.

La teneur en argile diminue régulièrement en profondeur en même temps que le pourcentage de limons augmente². Le développement de la structure, le degré de structuration sont bien marqués au sommet et diminuent d'une façon progressive vers le bas. On note l'absence d'horizon enrichi en minéraux peu altérables.

Exceptionnellement on peut observer quelques minéraux primaires altérables (micas plus ou moins altérés) à partir de 60 cm. L'horizon d'altération se situe toujours en-dessous de 1,50 m - 2 m.

1.3.2.2. Examen du profil cultural.

Du fait de l'érosion on note une épaisseur variable de l'horizon humifère, celle-ci est généralement de 10 à 15 cm. La structure grumeleuse est bien développée en surface ; le degré de structuration est élevé, la cohésion des agrégats moyenne, la porosité très forte. A la partie supérieure de l'horizon B sous-jacent la structure est polyédrique moyenne avec des agrégats assez bien individualisés. La porosité est élevée entre les agrégats, moyenne à l'intérieur de ceux-ci. Le passage des différents horizons est toujours progressif et l'on note l'absence de niveau compact. L'ensemble du

profil est bien prospecté par les racines ; celles-ci s'enfoncent verticalement et présentent une densité qui diminue progressivement vers le bas. Sur les sols labourés aucune semelle de labour n'est apparente.

1.3.2.3. Aptitude et mise en culture.

Bien qu'ils soient un peu sensibles à l'érosion, ces sols ont de très bonnes propriétés physiques. Les plantes cultivées ont un enracinement profond et prospectent un volume de sol important. Il ne semble pas qu'il soit nécessaire d'effectuer sur ces sols des labours profonds. Les cultures d'engrais verts (légumineuses, graminées), sans être déconseillées, ne paraissent pas impératives.

1.3.3. Les sols rajeunis typiques à structure bien développée.

1.3.3.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Les caractéristiques de ces sols sont très proches des précédents. La teneur en argile y est plus élevée au sommet¹.

Il n'y a aucun niveau compact. La structure est bien développée sur l'ensemble du profil. La cohésion des agrégats est forte ou très forte.

1.3.3.2. Examen du profil cultural.

La délimitation de l'horizon humifère vers le bas reste toujours imprécise. Généralement celui-ci atteint une épaisseur comprise entre 12 et 20 cm ; il a une structure grumeleuse bien développée. Le degré de structuration est élevé, la porosité très forte ; les agrégats sont très cohérents. La partie supérieure de l'horizon B (entre 20 et 60 cm ou plus) a une structure polyédrique moyenne avec une sous-structure polyédrique fine généralement bien individualisée. Le degré de structuration et la cohésion des agrégats sont élevés. La porosité reste forte entre les agrégats, plutôt faible à l'intérieur de ceux-ci. Entre 80 cm et 2 m on note généralement l'apparition de minéraux primaires altérables et l'on passe à un horizon BC qui est, au sommet, argileux à argilo-limoneux, et bien structuré. En profondeur les limons augmentent, la sous-structure disparaît et les agrégats deviennent poreux.

Le passage entre les différents horizons est toujours progressif, aucun niveau compact n'apparaît depuis le sommet jusqu'à la base du profil. Comme dans les sols précédents, sous végétation graminéenne naturelle, l'enracinement ne présente aucune anomalie : les racines très nombreuses diminuent progressivement avec la profondeur et peuvent s'enfoncer jusqu'à 80 cm ou même davantage. Sur les sols cultivés on n'observe jamais la formation de semelle de labour.

¹ Le rapport $\frac{\text{limons altérables et de néoformation}}{\text{argile}}$

est supérieur à 0,2.

² Les horizons supérieurs peuvent avoir un rapport $\frac{\text{limons altérables et de néoformation}}{\text{argile}}$ voisin ou légèrement supérieur à 0,2.

¹ Le rapport $\frac{\text{limons altérables et de néoformation}}{\text{argile}}$

est inférieur à 0,2.

1.3.3.3. Aptitude et mise en culture.

Ces sols paraissent également très favorables à une mise en culture. Les aptitudes seront pratiquement les mêmes que pour les sols à tendance pénervolue. On doit cependant noter que, plus riches en argile, ils ont une stabilité structurale plus élevée et ils sont moins sensibles à l'érosion.

1.3.4. *Les sols rajeunis typiques à structure plus ou moins dégradée.*

1.3.4.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Ces sols situés généralement sur des pentes plus faibles que les sols typiques à structure bien développée, présentent les mêmes caractéristiques si ce n'est le fait qu'entre l'horizon humifère et l'horizon B profond bien structuré s'individualise un horizon B1 légèrement compact à structure polyédrique émoussée. Mais cet horizon, à l'état humide, est très plastique; il n'est ni appauvri en argile, ni enrichi en minéraux peu altérables.

1.3.4.2. Examen du profil cultural.

L'horizon humifère, dont l'épaisseur moyenne se situe entre 12 et 15 cm, présente, à la base, une limite assez nette. La structure est grumeleuse, fine, mais le degré de structuration est moyen et l'on note une proportion relativement importante d'éléments poudreux non agrégés. La cohésion des agrégats est d'ailleurs moyenne; la porosité est cependant élevée. La partie supérieure de l'horizon B (B1 situé en moyenne entre 15 et 60 cm) présente une structure à tendance polyédrique. Les agrégats de taille moyenne sont plus ou moins cohérents, aucune sous-structure n'est apparente. Le degré de structuration est moyen: 40 à 50% de particules fines sont agrégées. La porosité semble également moyenne et la compacité est plus marquée que dans les horizons adjacents. En saison sèche, on peut observer quelques fentes de retrait dues à la dessiccation. Au-dessous, on passe, d'une manière progressive, à un horizon B2 où apparaît une structure polyédrique moyenne avec une sous-structure polyédrique fine; en même temps le degré de structuration augmente. Sous végétation graminéenne naturelle l'enracinement est surtout abondant dans l'horizon humifère. La densité des racines diminue d'une façon assez nette dans l'horizon B1. Quelques rares racines ont un aspect contourné, certaines ont tendance à prendre un cheminement plus ou moins horizontal. Il faut cependant signaler que de nombreux pivots traversent l'horizon B1. Pour les sols cultivés on note un émiettement exagéré de l'horizon de surface. Le sol labouré présente en fin de saison des pluies une forte proportion d'éléments fins détachés. Sur ce type de sol il n'a été observé que très rarement une semelle de labour. Lorsque celle-ci apparaît elle reste toujours peu marquée.

1.3.4.3. Aptitudes et mise en culture.

Ces sols, qui ont des propriétés physiques plus ou

moins favorables, paraissent assez facilement récupérables. Il semble possible, par des labours profonds, d'augmenter l'épaisseur de l'horizon humifère. Des sous-solages, en vue d'ameublir l'horizon B1, pourraient être envisagés car la stabilité structurale est assez élevée. L'utilisation de fumier et d'engrais verts est à conseiller pour augmenter la stabilité de l'horizon humifère; des labours de saison des pluies pourraient également augmenter la cohésion des mottes. Comme engrais verts on pourrait envisager la culture de légumineuses qui, par leur enracinement profond, sont susceptibles d'ameublir l'horizon B1. Mais les graminées, du fait de leur chevelu racinaire très dense, amélioreraient la stabilité de l'horizon superficiel.

1.3.5. *Les sols enrichis en minéraux peu altérables, à horizon friable.*

1.3.5.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Ces sols, qui ont été observés sur des coulées basaltiques dans la région d'Ambatolampy, ont, comme tous les sols enrichis en minéraux peu altérables, une teneur en argile relativement constante dans les horizons supérieurs. En profondeur la proportion d'éléments fins diminue alors que les limons augmentent. L'horizon B1, situé en dessous de l'horizon humifère, présente toujours une structure peu individualisée à tendance continue, la teneur en sables y est élevée par suite d'une concentration en minéraux résistants à l'altération. Très peu compact et très poreux, il apparaît friable à l'état humide, poudreux à l'état sec. Les éléments y sont très souvent agrégés d'une façon irréversible sous forme de pseudo-sables ou de pseudolimons. L'horizon B2 ou BC présente une structure plus ou moins individualisée.

1.3.5.2. Examen du profil cultural.

L'horizon humifère est généralement épais (15 à 20 cm). Sa structure est grumeleuse, secondairement particulaire; le degré de structuration est moyen et l'on note une proportion élevée d'éléments poudreux. La cohésion des agrégats n'est que moyenne, mais la porosité est très élevée et l'enracinement important. Le passage avec l'horizon sous-jacent B1 est progressif; celui-ci a une structure continue, il est plus ou moins riche en pseudo-particules, très poreux, peu compact, friable à l'état humide. En profondeur on passe progressivement à un horizon B2 (ou BC) où la structure polyédrique est bien affirmée, la sous-structure y est même très apparente.

Sous végétation graminéenne naturelle l'enracinement apparaît très abondant, la densité des racines diminue progressivement vers le bas. Il n'y a pas d'horizon compact dans ces sols bien que les éléments structuraux soient peu individualisés. Sous sols cultivés nous n'avons jamais observé de semelle de labour.

1.3.5.3. Aptitude et mise en culture.

Ces sols ont de bonnes propriétés physiques, ils sont bien prospectés par les racines. Afin d'éviter un émiet-

tement excessif de l'horizon superficiel, on pourrait envisager de les labourer à l'état humide afin d'augmenter la cohésion des mottes.

1.3.6. *Les sols enrichis en minéraux peu altérables à horizon compact et à structure plus ou moins dégradée.*

1.3.6.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Ces sols couvrent des pentes faibles (inférieures à 10%). Ils sont très faciles à reconnaître du fait de la présence, au-dessous d'un horizon humifère, d'un niveau B1 plus ou moins compact et à structure continue. Cet horizon B1 a le plus souvent une teinte plus jaune (ou plus ocre) que l'horizon sous-jacent qui est nettement rouge. A partir de 60 ou 80 cm, on passe progressivement à un horizon B2 à structure polyédrique bien individualisée ou, plus rarement, à un niveau à structure continue, mais friable et poreux. L'horizon BC sous-jacent a une structure polyédrique moyenne et très souvent, les agrégats ont tendance à se déliter en éléments plus fins.

1.3.6.2. Examen du profil cultural.

L'horizon humifère a, en général, une épaisseur inférieure à 10 cm. Sa structure grumeleuse est très peu marquée, le degré de structuration est faible et la proportion d'éléments fins non agrégés est dominante. Cependant la porosité paraît assez forte du fait de la prospection du système racinaire.

L'horizon B1 a une structure continue à éclats à faible tendance polyédrique ; il apparaît compact, peu pénétrable à l'outil. A ce niveau on observe fréquemment des traînées de matières organiques qui semblent résulter de la pénétration de l'horizon superficiel dans d'anciennes cavités dues à des insectes ou à une végétation disparue. Les fentes de retrait provoquées par la dessiccation sont très fréquentes en saison sèche.

A partir de 60 ou 80 cm la compacité est peu marquée et, suivant les cas, la structure polyédrique est plus ou moins bien individualisée.

Le passage de l'horizon humifère à l'horizon sous-jacent est toujours brusque. Sous végétation graminéenne les racines sont essentiellement localisées entre 8 et 10 cm ; on note une faible proportion de pivots qui traversent l'horizon compact. La plupart du temps les racines buttent sur l'horizon B1 : elles prennent alors un aspect contourné et peuvent suivre un trajet horizontal.

Sous sol labouré la formation d'une semelle de labour est très fréquente ; l'horizon travaillé poudreux peut être dégagé assez facilement, il paraît plus ou moins plaqué sur l'horizon sous-jacent. La limite entre ces horizons est cependant moins nette et plus irrégulière que dans les sols à structure fortement dégradée.

1.3.6.3. Aptitude et mise en culture.

Les propriétés physiques sont assez défavorables. Les horizons travaillés ont tendance à se réduire en poussière et seul l'horizon labouré est prospecté par

les racines. Il faudrait dans la mesure du possible approfondir les labours pour augmenter l'enracinement des cultures. Une application intensive de fumier et l'enfouissement d'engrais verts sont à conseiller dans le but d'augmenter la stabilité des agrégats de surface. Cependant, dans ces sols riches en gibbsite, pauvres en kaolinite, les résultats paraissent incertains. Une culture de légumineuse pourrait augmenter la perméabilité de l'horizon B1, et l'ameublir ; ce résultat a d'ailleurs été vérifié par l'examen de profils situés dans une parcelle plantée depuis 3 ans en stylosanthès. Il convient d'être prudent avant d'envisager des sous-solages car ces sols ont tendance après travail à se « refermer » et le résultat escompté ne sera pas toujours atteint.

13.7. *Les sols enrichis en minéraux peu altérables à horizon compact et à structure fortement dégradée.*

1.3.7.1. Caractéristiques pédologiques principales.

Situés sur des pentes nulles ou très faibles, ces sols se distinguent des précédents par l'individualisation d'un horizon B, ocre ou jaune, très compact, à structure continue. En profondeur, vers 80 cm ou davantage, on passe à un horizon BC qui contient des limons et des minéraux primaires plus ou moins altérés.

1.3.7.2. Etude du profil cultural.

L'horizon humifère est de très faible épaisseur (8 à 10 cm au maximum). La structure grumeleuse y est peu marquée, le degré de structuration très faible. Cependant la porosité et la prospection par les racines sont relativement élevées.

L'horizon B a une structure continue à éclats ou continue homogène. Il est très compact, non prospecté par les racines, et peu pénétrable à l'outil. Les fentes de retrait sont très fréquentes en saison sèche.

Le passage de l'horizon humifère à l'horizon suivant est très brusque. Sous végétation graminéenne les racines, localisées dans l'horizon humifère, ne pénètrent pas dans l'horizon B ; arrivées à ce niveau elles présentent un aspect contourné ou prennent un cheminement horizontal. Les seules racines qui réussissent à s'enfoncer sont celles qui utilisent des passages dus aux fentes de retrait. Sous sols labourés, il se forme une semelle de labour toujours très nette, l'horizon travaillé est littéralement placé sur l'horizon compact sous-jacent.

1.3.7.3. Aptitude et mise en culture.

On ne peut que répéter ici ce qui a été dit au paragraphe précédent ; il faut noter que ces sols ont des propriétés physiques encore plus défavorables. Leur récupération sera toujours difficile, longue et onéreuse. Les résultats à attendre sur ce type de sol seront plutôt médiocres.

1.3.8. *Les sols ferrallitiques rajeunis à horizon friable hydromorphes.*

Par rapport aux précédents, ces sols se distinguent

par la présence en saison des pluies, d'une nappe qui peut remonter jusqu'à 60 cm environ de la surface. La mise en culture de ces sols est essentiellement conditionnée par leur drainage.

2. PRÉSENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DANS LES ZONES ÉTUDIÉES.

2.1. ZONE DE MAHABO.

2.1.1. Le climat.

Il n'existe pas à Mahabo de station susceptible de fournir des données météorologiques complètes avec des relevés effectués sur une longue période. Le climat de cette localité, située à 35 km au nord-ouest de la capitale, et à la même altitude est très proche de celui de Tananarive dont nous préciserons les caractéristiques.

2.1.1.1. Les vents.

Les alizés de direction est et de sud-est soufflent en saison sèche. Durant l'été austral les vents d'est dominent encore, mais on observe un léger renforcement des vents de direction ouest et nord-ouest, venant de l'hémisphère nord. La vitesse moyenne du vent au sol varie entre 10 et 15 km/h ; elle est plus élevée entre février et mars. Certaines rafales précédant les orages, ou consécutives au passage d'un cyclone, peuvent atteindre des vitesses de 80 à 100 km/h ; elles provoquent des dégâts importants pour les cultures.

2.1.1.2. Les pluies.

En ce qui concerne la répartition des précipitations, il existe deux saisons très nettement délimitées. La saison sèche s'étend d'avril à octobre. La saison des pluies débute en octobre-novembre par des orages ; elle s'installe définitivement en décembre pour s'arrêter brutalement en avril. Les pluies sont dues à des phénomènes de convergence des alizés « d'est - sud-est » avec les vents « d'ouest - nord-ouest ». Les hauteurs d'eau tombée de novembre à mars représentent 87% des précipitations totales annuelles qui atteignent en moyenne 1 260 mm.

2.1.1.3. Les températures.

Les températures les plus fortes sont enregistrées entre octobre et mai pendant la période de culture sur tanety. La moyenne du mois le plus froid (juillet) est de 14°6. Les écarts diurnes varient peu de décembre à mai ; l'amplitude journalière maximale atteint 15° en octobre.

La moyenne annuelle est de 18°2.

2.1.1.4. L'évapotranspiration.

Il existe des formules climatiques pour calculer le bilan hydrique des sols : la formule de PRESCOTT, qui tient compte de la température et de l'humidité

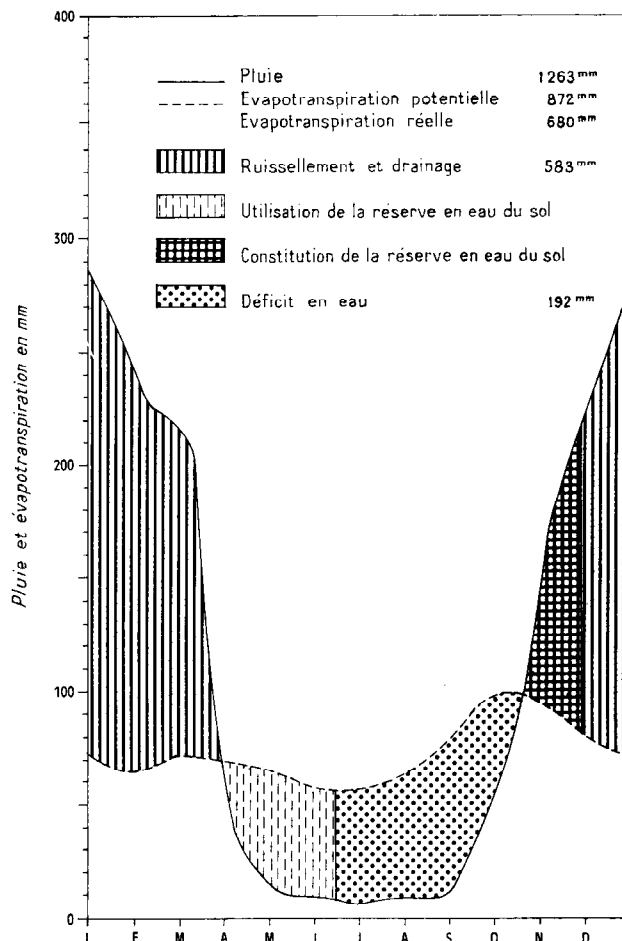


Fig. 3. — Tananarive - Ambatobe.

de l'air, s'est révélée selon J. RIQUIER (1959) la plus intéressante.

Pour représenter le bilan hydrique des sols, J. RIQUIER a adopté le mode de représentation de THORNWAITE (fig. n° 3). Si l'on admet que la réserve en eau est de 100 mm, le déficit en eau dure du 15 mai au 15 novembre et atteint 192 mm. Durant cette période il n'est pas possible de prévoir des cultures sur « tanety » sans irrigation. D'octobre à décembre le sol n'est, en général, que partiellement saturé et les plantes pourront souffrir de sécheresse, en particulier lorsque, par suite de conditions physiques défavorables, elles n'explorent qu'un faible volume de sol.

2.11.5. Les accidents climatiques.

La grêle est assez fréquente. Ainsi, au cours de la campagne 1970-71, il a été observé deux chutes de grêle qui ont causé des dégâts surtout sur les cultures de haricots.

Les cyclones, liés aux passages des dépressions, provoquent généralement des précipitations abondantes (jusqu'à 1 000 mmm en 5 jours). Pour les sols situés en zone plane et présentant des horizons compacts peu perméables, on peut craindre un excès d'eau préjudiciable à la végétation.

2.1.1.6. Conclusion.

A condition de choisir des dates convenables pour les semis, les facteurs climatiques sont, dans leur ensemble, favorables à une mise en valeur des « tanety ». Sauf année exceptionnelle, ces facteurs ne paraissent pas devoir jouer un rôle déterminant sur les rendements. L'effet de certains aléas climatiques (répartition des pluies) se trouve d'ailleurs renforcé, ou atténué, par une action indirecte du sol.

2.1.2. La géologie et le relief.

2.1.2.1. La géologie.

Les principales formations géologiques rencontrées correspondent à des gneiss, des gneiss granitoïdes (migmatites *sensu stricto*) et des granites migmatiques. Les gneiss, roches facilement décomposables, sont surmontées par d'épais manteaux d'altération limoneux à sableux fin. Les granites migmatiques qui sont des roches leucocrates et très quartzieuses, donnent des zones d'altération peu épaisses très sableuses qu'il conviendrait de protéger contre l'érosion. Les gneiss granitoïdes présentent des caractères intermédiaires entre ceux des granites et ceux des gneiss.

La zone d'affleurement des gneiss correspond aux points bas du relief alors que les granites constituent l'ossature des reliefs dominants et abrupts. Les granites migmatiques peuvent constituer des massifs plus ou moins importants ou des lames disposées suivant la schistosité des terrains métamorphiques. Les bancs de granites interstratifiés dégagés par l'érosion différentielle constituent de véritables « crêts ».

2.1.2.2. Le relief.

Comme nous l'avons précisé, il existe une relation assez étroite entre le modelé et la nature des affleurements pétrographiques. Cependant, l'évolution du relief a été essentiellement conditionnée par la dissection de deux anciens niveaux d'érosion. La surface d'érosion la plus ancienne (surface mesotertiaire ou niveau II : F. BOURCEAT, M. PETIT, 1969) est repérable, à l'ouest de Marinavaratra vers 1 450-1 470 m. Cette surface qui arase des roches d'altérabilité différente est dominée par des reliefs résiduels granitiques qui culminent vers 1 500-1 600 m.

La surface inférieure (fini-tertiaire ou niveau III) est bien représentée vers 1 350 m dans l'alvéole de Mahabo ; elle ne correspond pas à un aplanissement généralisé mais à une évolution d'unités indépendantes à l'amont des seuils rocheux qui barrent les rivières. Ce niveau, limité uniquement aux affleurements de roches facilement décomposables, forme des alvéoles plus ou moins étroites en bordure des axes hydrographiques. Il possède de nombreux reliefs résiduels

qui sont dégagés dans les bancs de granite stratoïde. Des reliefs dérivés du cycle II dominant également, entre 1 450 et 1 350 m, ce niveau local d'aplanissement. Le contact entre les niveaux II et III correspond à une zone de reliefs confus fortement attaquée par l'érosion et entaillée de « lavaka »¹.

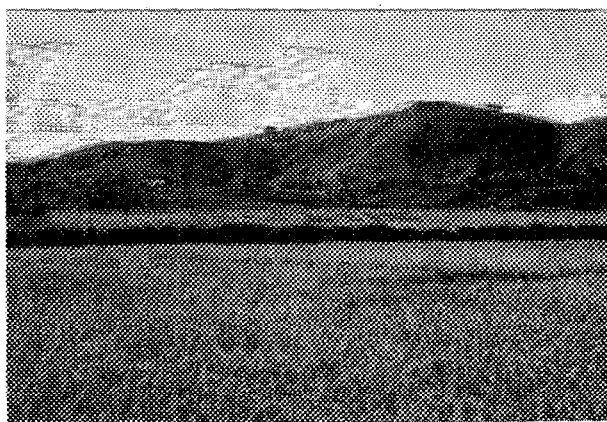
L'évolution récente du modelé, par suite de l'encaissement des axes hydrographiques établis sur les anciens niveaux, permet de distinguer dans la ZER² de Mahabo, en dehors des bas-fonds occupés par les rizières, cinq types de modelés qui correspondent à des ensembles ou petites unités géographiques régionales (cf. carte n° 1). On est ainsi amené à distinguer :

- la zone des reliefs résiduels et de dissection ;
- la zone des reliefs de rajeunissement et des reliefs dérivés du niveau II ;
- la zone des reliefs dérivés du niveau II ;
- la zone des reliefs dérivés du niveau II et de rajeunissement du niveau III ;
- la zone des reliefs de rajeunissement du niveau III (associés aux témoins de cette surface rajeunie).

Avant d'aborder la répartition des sols en fonction du modelé, il convient de préciser et de caractériser ces différents types de relief.

2.1.2.2.1. Les reliefs résiduels et de dissection.

Ces reliefs correspondent aux zones qui dominent les niveaux locaux d'aplanissement correspondant au cycle III. Ils peuvent résulter d'une dissection très poussée de la surface II ou correspondre à des reliefs épargnés par les cycles d'érosion. Les pentes sont très fortes (en moyenne supérieure à 45%). Les versants se recoupent le long d'arêtes vives. Le système hydrographique, plus ou moins encaissé, correspond au développement de ravines à pente forte ; les bas-fonds sont inexistantes. L'érosion aréolaire est très forte ; elle sévit le long d'axes privilégiés qui peuvent dégé-



¹ Ravine à parois verticales résultant d'un processus particulier d'érosion entaillant profondément les versants des Tanety.

² Z.E.R. : Zone d'Expansion Rurale.

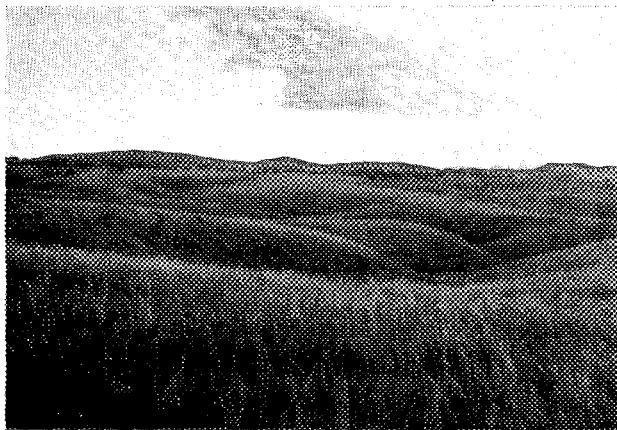
nerer très facilement en « lavaka ». Mais cette forme spectaculaire d'érosion ne s'observe que dans les reliefs de dissection portés par des roches facilement décomposables et situés en dessous de 1 450 m. Dans les reliefs résiduels, où l'altitude peut atteindre 1 500 - 1 600 m, les affleurements de roches granitisées (sous forme de boules) sont fréquents.

2.1.2.2.2. *L'association des reliefs de rajeunissement et des reliefs dérivés du niveau II.*

L'évolution du modelé a été retardée par la fréquence des affleurements de lames granitiques qui se sont opposées à l'encaissement du système hydrographique lors des reprises d'érosion récentes. On observe généralement, vers 1 425-1 450 m, une succession de croupes convexes d'interfluves qui ne présentent pas de replats sommitaux et, qui, de plus, ont une pente longitudinale pouvant atteindre 10% à 20%.

Localement on passe à des reliefs de rajeunissement où le modelé s'apparente à celui qui est décrit au paragraphe 21225, ailleurs on peut noter la présence de collines à pente plus forte qui correspondent à de véritables reliefs dérivés.

Cette région correspond à une zone où le relief assez confus est susceptible de varier assez rapidement d'un point à un autre. Le système hydrographique y est encaissé. Les talwegs sont occupés par des bas-fonds relativement étroits et plus ou moins bien drainés ; les sols hydromorphes minéraux y sont d'ailleurs fréquents.



2.1.2.2.3. *Les reliefs dérivés du niveau II.*

Cette rone correspond à une forte reprise d'érosion de l'ancienne surface.

Les pentes sont généralement fortes (voisines de 45%). Le paysage est constitué par un ensemble de collines arrondies qui culminent à des altitudes légèrement différentes. L'érosion sur les interfluves est forte : localement, il y a formation de « lavaka ». L'encaissement du système hydrographique est très accu-



sé ; les talwegs ont une pente marquée et les bas-fonds, à extension très réduite, sont occupés essentiellement par des sols peu évolués.

2.1.2.2.4. *Les reliefs dérivés du niveau II associés aux reliefs de rajeunissement du niveau III.*

Liée à une structure géologique complexe, on note là une association également complexe des formes du relief. Les pentes sont très variables d'un lieu à un autre. On passe, en effet, très rapidement, des reliefs de rajeunissement du niveau III, qui sont portés par des roches métamorphiques litées, à des reliefs dérivés du niveau II qui correspondent aux zones d'affleurement des roches plus ou moins granitisées. L'altitude varie de 1 350 à 1 425 m.



A l'arrière plan : les reliefs dérivés.
Aux deux premiers plans : les reliefs de rajeunissement.

2.1.2.2.5. *Les reliefs de rajeunissement du niveau III associés aux témoins de surface rajeunie.*

Ce type de relief s'observe, vers 1 350 m d'altitude,

dans la région de Mahabo. Le modelé est constitué par une multitude de croupes d'interfluve. Celles-ci culminent à une même altitude et présentent une pente longitudinale peu marquée. Sur les reliefs de rajeunissement les croupes ont une pente transversale toujours prononcée ; par contre sur les témoins de la surface rajeunie on note le développement de larges replats sommitaux qui peuvent atteindre une centaine de mètres.

L'encaissement du système hydrographique est peu marqué, l'érosion plutôt faible ; les bas-fonds, à pente indécise, sont généralement occupés par des sols hydromorphes plus ou moins organiques.



Relief résiduel (à l'arrière plan) dominant le niveau III.

2.1.3. Sols : répartition et propriétés générales.

2.1.3.1. Répartition.

On note, comme il l'a déjà été signalé, une relation très étroite entre les types de reliefs et la nature des sols qui les recouvre. Cette interdépendance apparaît bien dans le tableau suivant :

2.1.3.2. Propriétés générales des sols.

Du point de vue chimique l'analyse d'une quinzaine d'échantillons prélevés dans l'horizon de surface a montré qu'avant l'application d'une fumure de redressement, tous ces sols étaient très pauvres du point de vue chimique. Le pH est compris entre 4,6 et 5,1. La capacité d'échange atteint en moyenne 7,1 me % et les variations se situent entre 4 et 9,3 me. La moyenne du taux de saturation, qui ne dépasse jamais 14% est de 6%. La somme des bases échangeables varie entre 0,1 et 1,3 me/100 g avec une moyenne de 0,4 me%. Par contre, les sols sont moyennement pourvus en azote (1,3‰).

Après application d'une fumure de redressement minérale et organique (60 t fumier, 160 kg P₂O₅, 120 kg K₂O, 1 t de dolomie/ha), S remonte entre 0,6 et 2,6 me %, le taux de saturation entre 9 et 35% et le pH entre 4,9 et 5,7%.

Types de reliefs	Types de sols dominants ou associations dominantes
Reliefs de dissection du niveau II et reliefs résiduels	— Sols ferrallitiques rajeunis typiques à tendance pénévoulée (type 2). — Sols ferrallitiques pénévoulés (type 1).
Reliefs dérivés du niveau II	— Sols ferrallitiques rajeunis typiques à structure ± dégradée (type 4). — Sols ferrallitiques rajeunis typiques à structure bien développée (type 3). — Sols ferrallitiques rajeunis typiques à tendance pénévoulée (type 2).
Reliefs de rajeunissement associés à des reliefs dérivés du niveau II	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables, à structure + dégradée (type 6).
Reliefs de rajeunissement du niveau III plus reliefs dérivés du niveau II	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables à structure ± dégradée (type 6). — Sols ferrallitiques rajeunis typiques à structure ± dégradée (type 4).
Reliefs de rajeunissement et témoins de surface rajeunie du niveau III	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables : — à structure fortement dégradée (type 7) ; — à structure ± dégradée (type 6).

En résumé, on peut dire que dans ces différents sols, où la teneur en argile est comprise entre 25 et 54%, il n'y a pas de différence très significative du point de vue chimique. On doit cependant noter que les sols formés sur des reliefs dérivés de l'ancienne surface sont les plus sableux et les plus carencés. Ceci est dû à la nature de la roche sous-jacente et à l'ancienneté du matériau originel. On note d'ailleurs dans ces zones la formation de résidus d'altération gibbsitique.

Les propriétés physiques des sols ferrallitiques sur lesquelles nous avons beaucoup insisté sont, par contre, très variables et elles sont susceptibles de jouer un rôle déterminant sur la productivité des différents sols.

2.2. ZONE D'AMBATOLAMPY.

Nous insisterons uniquement sur les données caractéristiques de la région d'Ambatolampy qui permettent de la distinguer de la zone de Mahabo. De nombreux caractères sont, en effet, identiques dans ces deux zones.

2.2.1. Le climat.

Très proche de celui de Mahabo, il se caractérise toutefois par une pluviosité plus forte ainsi qu'une

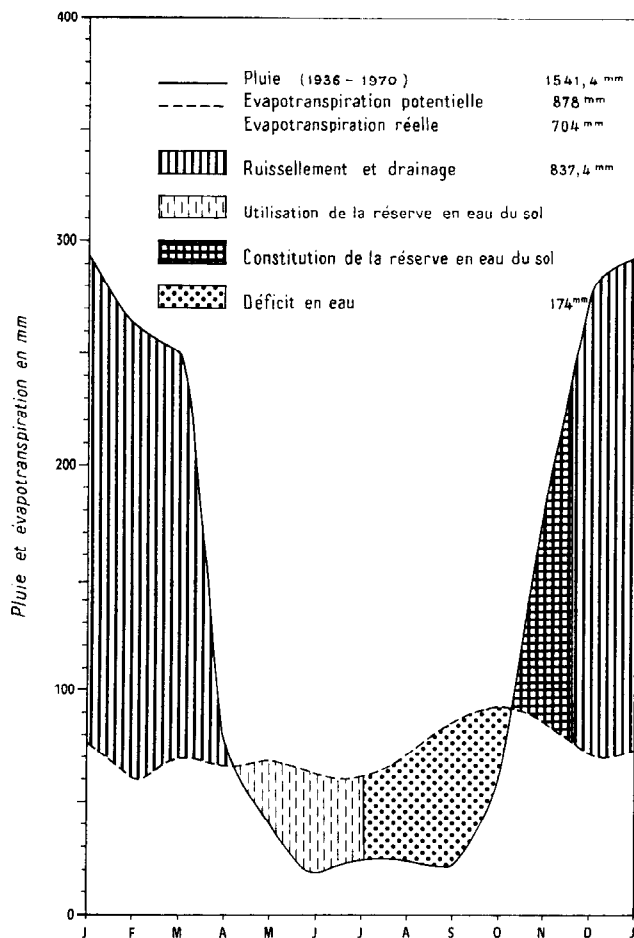


Fig. 4. — Ambatolampy.

température moyenne légèrement plus basse. En début de saison des pluies les chutes de grêle y sont plus importantes. La pluviosité totale atteint 1 541 mm à Ambatolampy (moyenne de 36 ans). La température moyenne annuelle est de 13°2.

L'évapotranspiration est proche de celle de Mahabo. La pluviosité durant les mois de la saison sèche (avril à octobre) étant par ailleurs plus élevée (270 mm contre 143 mm), le déficit en eau est moindre (cf. fig. n° 4).

2.2.2. La géologie et le relief.

2.2.2.1. La géologie.

A l'est d'Ambatolampy dominent des formations métamorphiques constituées par des micaschistes, des gneiss et des granites migmatiques.

A l'ouest, les coulées volcaniques basaltiques issues du massif de l'Ankaratra ont donné des prolongements jusqu'à Ambatolampy.

En bordure des axes hydrographiques principaux et au-dessus des dépôts alluviaux actuels, il est possible

de distinguer un système de terrasses ancien appartenant à la série sambainienne.

En dehors des zones granitiques l'altération est ancienne et intense. Les zones de départ des sols sont profondes et fortement lixivées.

2.2.2.2. Le relief.

Les formations cristallines ont été arasées au cours du cycle méso-tertiaire et on retrouve des témoins plus ou moins bien conservés de la surface II vers 1 600-1 650 m. En bordure de l'Onive et au-dessus des terrasses anciennes se dégage le niveau III relativement bien conservé vers 1 575 m.

Les coulées basaltiques ont formé des surfaces structurales qui sont généralement peu cuirassées.

Comme dans la zone de Mahabo l'encaissement du système hydrographique et les reprises d'érosion ont entraîné la formation de différents types de reliefs. On distingue :

- les reliefs granitiques résiduels ;
- les reliefs dérivés du niveau II ;
- une zone de reliefs dérivés et de rajeunissement du niveau II ;
- une zone où sont associés des reliefs de rajeunissement du niveau III et des témoins de la surface rajeunie ;
- les reliefs dérivés d'anciennes coulées ;
- les reliefs de dissection d'anciennes coulées ;
- les reliefs de rajeunissement d'anciennes coulées ;
- les reliefs correspondant aux terrasses anciennes.

Les reliefs formés sur cristallin ne présentent pas de caractéristiques particulières par rapport à ceux décrits précédemment. Le décalage altimétrique observé entre les niveaux II et III y est cependant moins prononcé. Cette particularité a pour origine l'inversion du système hydrographique, après mise en place du massif volcanique de l'Ankaratra, qui a entraîné un retard dans l'usure des seuils rocheux de l'Onive.

Sur les coulées basaltiques anciennes (plio-quaternaires) la morphologie du modelé s'apparente étroitement à celle décrite sur cristallin. Les reliefs de rajeunissement sont toujours constitués par des croupes convexes d'interfluves avec une pente longitudinale faible. Les reliefs dérivés correspondent à ces collines molles culminant à une altitude sub-égale. Les reliefs de dissection ont des pentes fortes et des sommets aigus.

Sur ces coulées basaltiques on trouve certains niveaux cuirassés, plus fréquents sur les reliefs de rajeunissement que sur les reliefs dérivés.

Sur les terrasses alluviales anciennes il y a seulement encaissement des talwegs et conservation d'interfluves très plats. Le drainage n'y est pas toujours bien assuré.

2.2.3. Répartition et propriétés générales des sols.

2.2.3.1. Répartition des sols.

La répartition des sols en fonction du modelé est résumée dans le tableau suivant :

2.2.3.2. Propriétés générales.

Les sols formés sur cristallin présentent les mêmes caractéristiques chimiques que ceux de la région de Mahabo.

Type de reliefs	Type de sol dominant
<i>Zone cristalline</i>	
Reliefs résiduels	— Sols ferrallitiques pénévoulés (type 1).
Reliefs dérivés du niveau II	— Sols ferrallitiques rajeunis typiques à tendance pénévoulés (type 2).
Reliefs de rajeunissement associés à des reliefs dérivés du niveau II	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables à structure \pm dégradée (type 6).
Reliefs de rajeunissement et témoin de la surface rajeunie du niveau III	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables : — à structure fortement dégradée (type 7) ; — à structure \pm dégradée (type 6).
<i>Zone volcanique</i>	
Reliefs de dissection d'anciennes coulées	— Sols ando. — Sols ferrallitiques pénévoulés (type 1).
Reliefs dérivés d'anciennes coulées basaltiques	— Sols ferrallitiques pénévoulés typiques (type 1).
Reliefs de rajeunissement des coulées basaltiques	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables à horizon friable (type 5). — Sols ferrallitiques pénévoulés ; ces sols se trouvent sur les pentes (type 1) — Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables, indurés.
Terrasses anciennes	— Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables à horizon friable (type 5). — Sols ferrallitiques rajeunis hydromorphes (type 8). — Sols hydromorphes.

Sur roche volcanique, le pH des sols est compris entre 5 et 5,4, la capacité d'échange atteint en moyenne 13 me/100 g, le taux de saturation est généralement inférieur à 5%, la somme des cations échangeables se situe entre 0,3 et 0,5 me. Par contre, les teneurs en azote sont convenables : 1,9 à 2,6%. Après fertilisation le pH remonte entre 5,2 et 5,7, la somme des bases échangeables entre 2 et 5 me et le taux de saturation entre 10 et 30%.

L'élévation du taux de saturation et des éléments échangeables apparaît ainsi beaucoup plus marquée pour les sols dérivés de roches basiques que pour les sols issus de matériaux cristallins bien qu'il n'y ait pas

de différence significative entre ces deux types avant fertilisation. Il est par ailleurs intéressant de noter que la plupart des sols formés sur roches basiques possèdent de bonnes propriétés physiques.

3. ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE RENDEMENTS EN MAÏS, TYPE DE SOL ET MODELÉ.

3.1. GÉNÉRALITÉS SUR LA CULTURE DU MAÏS.

Le maïs constitue la tête d'assolement d'un schéma (S.M.C.S.) de 6 parcelles d'environ 10 arcs chacune. Nos observations ayant porté sur des schémas nouvellement mis en place, les maïs dont il est fait question dans cette étude ont donc été installés sur défriche. Ils ont reçu à l'hectare :

- 1 t de dolomie,
- 750 kg de PK 21-16,
- 40 t de fumier dont 2/3 au labour et 1/3 au semis (localisé au pied),
- 140 kg d'urée dont 70 au semis et 70 au sarclage (au pied).

Le maïs est semé dans des sillons espacés de 70 cm à raison de 2 graines par poquet. Ces derniers sont également espacés de 70 cm sur la ligne. En fait, la densité observée au semis a été en moyenne de 37 000 pieds/ha. Au moment de la récolte, elle n'était plus que de 32 000 ha pieds/ha. La perte due à la non levée et à l'attaque des jeunes plantes par des mulots et insectes nuisibles reste limitée à 13,5% en moyenne, elle est cependant très variable suivant les niveaux de rendements : les plus forts rendements ont le taux de perte le plus faible. Il semble y avoir une relation entre taux de pertes au semis, type de sol, et façons culturales.

Le sarclage et le buttage se font au mois de janvier. L'intervalle semis-récolte (semis au mois de novembre, récolte au mois d'avril) est en moyenne de 175 jours. La hauteur des plantes mesurées au dernier nœud, au moment de la récolte varie en moyenne de 150 cm pour les faibles rendements à 250 cm pour les forts rendements.

Les variétés utilisées sont locales et indéterminées.

3.2. LES RENDEMENTS.

Les rendements obtenus sur l'ensemble des parcelles suivies à Mahabo et à Ambatolampy sont distribués suivant le tableau ci-après.

La moyenne générale sur les 81 données de rendements est de 3,64 t/ha. La répartition des effectifs par classe montre que 64% des rendements sont groupés entre 2 t et 4,5 t. L'écart entre les forts et les faibles rendements est suffisamment important pour justifier une recherche des facteurs principaux qui en sont responsables.

Nous avons vu que les sols dérivés de matériaux volcaniques présentent dans l'ensemble des propriétés physiques satisfaisantes alors que celles-ci sont très variables dans les sols formés sur roches cristallines.

TABLEAU DE DISTRIBUTION DES RENDEMENTS DE MAÏS A MAHABO ET A AMBATOLAMPY

Classe (t/ha)	Effectif	Effectif cumulé	% cumulé
Inférieure à 1,50	3	3	3,7
1,51 - 2,00	6	9	11,0
2,01 - 2,50	10	19	23,4
2,51 - 3,00	10	29	25,8
3,01 - 3,50	9	38	46,9
3,51 - 4,00	13	51	62,9
4,01 - 4,50	10	61	75,3
4,51 - 5,00	6	67	82,7
5,01 - 5,50	5	72	88,9
5,51 - 6,00	4	76	93,8
6,01 - 6,50	2	78	96,3
6,51 - 7,00	2	80	98,8
Supérieure à 7,01	1	81	100,0
Total	81	81	100,0

Dans ces conditions, il nous est apparu intéressant de comparer les rendements obtenus dans l'un et l'autre cas (sols sur roches volcaniques et sols sur roches cristallines).

	Rendements sur roches volcaniques	Rendements sur roches cristallines
Minimum-maximum	2 - 7 t/ha	0,9 - 7 t/ha
Nombre de données	27	54
Moyenne	4,16 t/ha	3,38 t/ha
Ecart type	1,31	1,40
Coefficient de variation	31%	41%

L'examen sommaire des facteurs du rendement, à l'exception du facteur sol, n'amène pas d'explications satisfaisantes des écarts de rendements, sauf pour les 27 rendements sur sols d'origine volcanique où le facteur densité semble jouer un rôle important.

Nous allons examiner dans ce qui va suivre, une classification des rendements suivant les types de sols définis dans les chapitres précédents. Indépendamment, une distinction suivant les types de reliefs nous permettra de comparer l'efficacité des deux modes de classification et de vérifier ainsi la liaison entre association de sols et type de reliefs.

Sur chaque parcelle l'examen d'un profil pédologique a permis de déterminer le type de sol.

Les types de reliefs et leurs délimitations ont été précisés par des observations de terrain, l'examen des photographies aériennes et celui des fonds topographiques.

3.3. CLASSIFICATION DES RENDEMENTS SUIVANT LES TYPES DE SOLS.

3.3.1. Sur roches volcaniques.

27 parcelles ont été observées.

4 types de sols ont été reconnus sous maïs.

Type 1 — Sols ferrallitiques pénévolués.

Type 3 — Sols ferrallitiques rajeunis typiques.

Type 5 — Sols ferrallitiques rajeunis enrichis en minéraux peu altérables à horizon friable.

Type 8 — Sols ferrallitiques rajeunis hydromorphes.

TABLEAU DES DONNÉES DES RENDEMENTS EN MAÏS A AMBATOLAMPY

Sols	Rendements en maïs à 15% d'humidité	Somme	Nbre de données	Moyenne
Type 1	6,54 6,95 4,15 4,38 3,71 3,29 2,88 5,76	37,66	8	4,71
Type 3	4,76 4,16	8,92	2	4,46
Type 5	4,33 5,28 3,94 3,77 2,11 5,32 1,95 5,30 3,79 4,24 5,16	45,19	11	4,11
Type 8	3,21 5,82 3,64 2,13 2,94 2,84	20,58	6	3,43
Total	...	112,35	27	4,16

Somme totale des carrés : 512,1547.

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F
Totale	26	44,6539	—	
Types de sol	3	5,8049	1,93	1,14
Résiduelle	23	38,8490	1,69	

Sur roches volcaniques il ne se dégage pas de différence significative entre les rendements sur les différents types de sol. Les variations intra-type de sol sont aussi importantes que celles qui existent entre les types de sol, mais le nombre de données reste faible pour pouvoir conclure.

3.3.2. Sur roches cristallines.

54 parcelles ont été observées.

5 types de sol ont été reconnus.

Type 2 — Sol ferrallitique rajeuni typique à tendance pénévoluée.

Type 3 — Sol ferrallitique rajeuni typique.

Type 4 — Sol ferrallitique rajeuni typique à structure plus ou moins dégradée.

Type 6 — Sol ferrallitique rajeuni enrichi en minéraux peu altérables à structure plus ou moins dégradée.

Type 7 — Sol ferrallitique rajeuni enrichi en minéraux peu altérables à structure fortement dégradée.

TABLEAU DES DONNÉES DE RENDEMENTS EN MAÏS A MAHABO ET A AMBATOLAMPY (Sols sur roches cristallines)

Sols	Rendements en maïs grain à 15% d'humidité (en t/ha)						Somme	Nbre de données	Moyenne
Type 2	6,25	3,51	3,83	5,27	4,89	5,90	33,28	7	4,75
Type 3	3,19	7,07	5,92	4,23	4,16		24,57	5	4,91
Type 4	3,83	3,32	4,41	3,24	2,56	3,49	45,95	12	3,83
Type 6	1,85	1,94	2,17	3,76	3,89	4,05			
	6,05	2,58	3,46	2,76	2,42	1,77			
	3,45	3,59	4,26	2,78	2,25	3,13			
	2,29	2,04	1,58	2,12	1,68	2,84			
	2,98	2,18					73,87	26	2,84
Type 7	1,76	1,37	0,88	0,90			4,91	4	1,23
Total							182,60	54	3,38
Somme totale des carrés : 707,3857									

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F
Totale	53	89,9272		
Type de sol	4	53 5074	13,37	18,06**
Résiduelle	49	36 4198	0,74	

L'analyse de variance indique que la variation des rendements due aux types de sol est supérieure à la variation aléatoire. Elle rend compte de 59,5% de la variation totale.

Le test de KEULS (cf. annexe) permet de dire qu'il existe des différences significatives entre les rendements obtenus sur les types de sol à l'exception des types 2 et 3.

Ces différences et leur intervalle de confiance sont reportés dans le tableau suivant :

Différences entre types de sol	Δ (en t/ha)
Entre :	
3 et 7	3,68 ± 1,12
2 et 7	3,52 ± 1,05
4 et 7	2,60 ± 0,96
6 et 7	1,61 ± 0,79
3 et 6	2,07 ± 1,05
2 et 6	1,91 ± 0,96
4 et 6	0,99 ± 0,79
3 et 4	1,08 ± 0,96
2 et 4	0,92 ± 0,79

Cette analyse porte uniquement sur la zone de Mahabo pour laquelle nous possédions un grand nombre de rendements.

3.4. CLASSIFICATION DES RENDEMENTS SUIVANT LES ZONES DE RELIEF.

Après avoir délimité les différentes unités morphologiques caractérisées chacune par des associations plus ou moins complexes des types de relief défini au paragraphe 212, il a été possible de situer sur carte l'emplacement des parcelles observées, et de classer les rendements en fonction des zones ainsi délimitées qui sont :

Zone I. — Reliefs dérivés du niveau II, reliefs de dissection du niveau II associés à des reliefs résiduels.

Zone II. — Reliefs de rajeunissement du niveau III associés à des reliefs dérivés du niveau II.

Zone III. — Reliefs de rajeunissement du niveau I associés à des reliefs dérivés.

Zone IV. — Reliefs de rajeunissement du niveau III et témoins de surface rajeunie.

TABLEAU DES DONNÉES DE RENDEMENTS EN MAÏS CLASSÉS SUIVANT LES ZONES DE MODELÉ MORPHOLOGIQUE (Commune de Mahabo)

Zones	Rendements en maïs grain à 15% d'humidité (en t/ha)						Nbre de Moyenne		
							Somme	données	
I	4,89	3,84	3,19	3,32	6,25	5,27	26,76	6	4,46
II	2,56	4,41	1,85	4,26	6,05	4,16	51,41	14	3,67
	3,24	3,49	4,53	3,83	3,51	2,76			
III	2,78	2,25	3,13	2,18	2,29	1,68	27,69	12	2,30
	2,12	2,04	1,58	1,77	2,42	3,45			
IV	4,05	3,76	3,89	2,58	1,76	1,37	21,52	8	2,69
	1,94	2,17							
Total							127,38	40	3,18
Somme totale des carrés :							463,4970		

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F
Totale	39	57,8554		
Types de relief	3	24,2762	8,09	8,68 **
Résiduelle	36	33,5792	0,93	

Le tableau précédent montre qu'il existe des différences significatives entre les moyennes de rendements obtenus dans les différentes zones.

La distinction des rendements par unité morphologique rend compte de 42% de la variation totale.

Le test de Keuls fait apparaître les différences significatives suivantes.

Différences entre zones	Δ (en t/ha)
Entre :	
I et III	2,16 ± 1,18
II et III	1,37 ± 1,07
I et IV	1,77 ± 1,07
II et IV	0,98 ± 0,89

4. DISCUSSION — CONCLUSION.

Sur matériau volcanique les propriétés physiques des sols sont toujours excellentes et les rendements moyens en maïs s'étalent de 3,4 à 4,7 t/ha. Sur roches cristallines ceux-ci varient entre 1,2 et 4,9 t/ha, les meilleurs rendements étant précisément obtenus sur les sols présentant les meilleures propriétés physiques ; sur les sols présentant des horizons compacts les rendements deviennent très faibles (l'utilisation du fumier et les cultures d'engrais verts s'avèrent alors particulièrement efficaces et nécessaires).

Il en ressort que des propriétés physiques favorables (bonne structure, porosité élevée, faible compacité, etc.) se traduisent toujours par des rendements élevés.

A l'intérieur d'un même type de sol, d'autres facteurs sont susceptibles d'intervenir (dates et densité de semis, façons culturales, fumure, parasitisme, etc.). L'analyse de ces derniers gagne donc à être faite dans une unité parfaitement définie et homogène.

Il est à noter que lorsque les conditions climatiques sont défavorables, les différences de rendement entre les types de sols apparaissent plus nettement. En effet, sur les sols à structure dégradée, l'enracinement, qui n'est que superficiel, rend la plante plus sensible aux fluctuations climatiques. Si l'effet d'une courte période sèche après le semis est souvent nuisible aux cultures quel que soit le type de sol, il s'est révélé beaucoup plus néfaste sur les sols présentant un horizon compact, que sur les autres.

Au cours de cette étude nous avons défini différentes zones de relief et nous avons montré qu'il existait une liaison entre les rendements et les unités morphologiques définies. Bien que cette liaison soit moins étroite que celle qui existe avec les types de sols, elle reste significative car chaque unité est, en fait, caractérisée par un type de sol dominant.

Les zones les plus favorables sont celles où le relief est le plus accentué. Mais sur les pentes les plus fortes, les sols sont limoneux, érodables, et leur mise en valeur, à l'exception de la reforestation, doit être abordée avec prudence. Sur les pentes modérées, observées sur les reliefs résiduels et surtout dérivés, les sols, argileux, bien structurés, sont favorables aux cultures.

Dans les reliefs moins marqués, correspondant aux anciens niveaux d'érosion peu disséqués, les sols ont des propriétés physiques plus ou moins défavorables. C'est le cas, en particulier, des replats très étendus sur lesquels les sols sont effectivement dégradés et difficiles à récupérer. Cependant, dans les zones correspondant aux reliefs de rajeunissement, les sols, moins dégradés, et heureusement les plus répandus, sont susceptibles d'être améliorés par des techniques culturales appropriées (prairie de légumineuse, apport massif de fumier, labours profonds, etc.).

En conclusion, on peut dire que la reconnaissance et la délimitation des unités morphologiques permet, dans une première approche, d'affecter à chacune d'elles un seuil de production déterminé et ainsi de sélectionner les zones les plus favorables.

Dans un deuxième temps, il convient de préciser dans chaque unité retenue, la localisation et l'extension exacte des différents types de sols.

Il convient enfin de souligner que, malheureusement, les sols les plus favorables sont situés sur des pentes plus ou moins marquées, ce qui détruit un préjugé trop répandu qui consiste à admettre que seules les zones planes sont aménageables. Ce critère, valable sur le plan de la défense des sols et de la mécanisation des cultures, est à revoir sur le plan de la mise en valeur pour l'ensemble des hautes terres de Madagascar.

ANNEXE

TEST DE KEULS¹

L'analyse de variance sur les données de rendements en maïs classés suivant les 5 types de sol a montré qu'il existe des différences significatives entre les moyennes. Le test de Keuls a pour but de déterminer lesquelles de ces différences sont significatives au seuil de 5% et de donner ensuite leur intervalle de confiance.

On utilise la table des valeurs de Q^2 . Celles-ci varient avec le rang de la moyenne considérée prise dans l'ordre décroissant. Par exemple entre la moyenne la plus élevée 4,91 et la plus petite 1,23 le nombre de traitement a doit être pris égal à 5, ainsi Q lu dans la table est de 4,01 pour 49 degrés de liberté.

La valeur de l'estimé de la variance est de 0,74 (ligne erreur résiduelle du tableau d'analyse de variance, 49 degrés de liberté).

Le nombre de données n'étant pas le même dans chaque type de sol, le nombre moyen de données est estimé par :

$$n_0 = \frac{1}{a-1} \left(\sum n_i - \frac{\sum n_i^2}{\sum n_i} \right)$$

a = nombre de types de sol

n_i = nombre de données dans chacun des types de sol

$$\sum n_i = 7 + 5 + 12 + 26 + 4 = 54$$

Le calcul donne $n_0 = 9,29$

d'où :

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{0,74}{9,29} = 0,0796$$

$$s_{\bar{x}} = 0,28$$

Entre la première et la dernière, la plus petite différence significative, au seuil de 5% est de :

$$Q s_{\bar{x}} = 4,01 \times 0,28 = 1,12 \text{ pour } a = 5 \text{ et } 49 \text{ ddl}$$

Le calcul pour $a = 4$, $a = 3$, $a = 2$ nous donne respectivement les plus petites différences significatives suivantes : 1,05 - 0,96 - 0,79.

Remarquons que cette dernière valeur peut être

obtenue avec la méthode habituelle de comparaison entre deux moyennes avec 49 ddl. En effet, le test de Student donne :

$$t = 2,01 \text{ et } s_d = 0,28\sqrt{2}$$

$$t s_d = 0,79$$

Le tableau suivant montre les différences significatives marquées d'un * au seuil de 5%.

Types de sol	Moyenne \bar{x}	$\bar{x} - 1,23$	$\bar{x} - 2,84$	$\bar{x} - 3,83$	$\bar{x} - 4,75$
3	4,91	3,68 * (1,12)	2,07 * (1,05)	1,08 * (0,96)	0,16 (0,79)
2	4,75	3,52 * (1,05)	1,91 * (0,96)	0,92 * (0,79)	
4	3,83	2,60 * (0,96)	0,99 * (0,79)		
6	2,84	1,61 * (0,79)			
7	1,23				

L'intervalle de confiance de la différence entre deux moyennes s'obtient en ajoutant et en retranchant la valeur de cette différence de la plus petite différence significative correspondante (chiffre situé entre parenthèses). Par exemple, la différence entre les rendements moyens de maïs sur type de sol 3 et type de sol 7 se situe entre 2,56 et 4,80 t/ha.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOURGEAT (F.) - 1972 - Sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du Quaternaire. Mémoire ORSTOM, n° 57, 324 p.

BOURGEAT (F.) et AUBERT (G.) - 1971 - Les sols ferrallitiques à Madagascar. ORSTOM, Tananarive, 31 p., multigr.

HUYNH VAN NHAN, ROUHAN (F.) et VICARIOT (F.) - 1971 - Rapport de campagne 1970-1971 : Observations sur des secteurs modernisés de cultures sèches dans l'URER de Tananarive. ORSTOM, Tananarive, 56 p., multigr. + annexes.

I.R.A.M. - 1967 - Synthèse des résultats obtenus par l'I.R.A.M. sur la fertilisation de fond à Madagascar (1964-1966). Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive (Madagascar), pp. 989-991.

MAYET (M.) - 1971 - La mise en culture rationnelle des « tanety » préconisé par l'U.R.E.R. de Tananarive. Université de Madagascar, E.N.S.A. Mémoire de fin d'études, 108 p. multigr.

SNEDECOR (G. W.) - Statistical Methods, IOWA State University Press, 5^e édition.

U.R.E.R. de Tananarive - 1970 - Doc. n° 800/OPR/

¹ Cf. « Snedecor, Statistical methode », Iowa State University Press, 5^e édition, p. 253.

² « Biometrika », 39, 192 (1952), reproduit dans « Snedecor », p. 252.

UT/D. Méthode employée dans l'U.R.E.R. de Tananarive pour la vulgarisation d'un assolement. M.A.E.R. Direction de l'Agriculture, 151 p. multigr.

VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.) - 1967 - Fertilisation de redressement après diagnostic des carences minérales sur sols de culture sèche à Madagascar. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), p. 874-915'

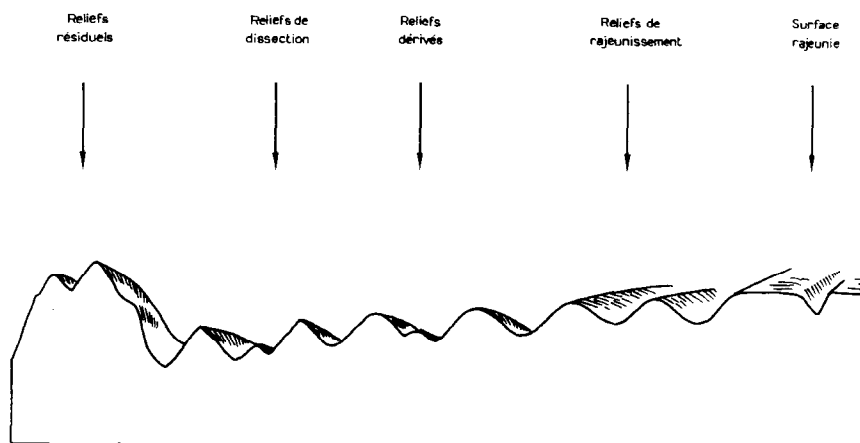
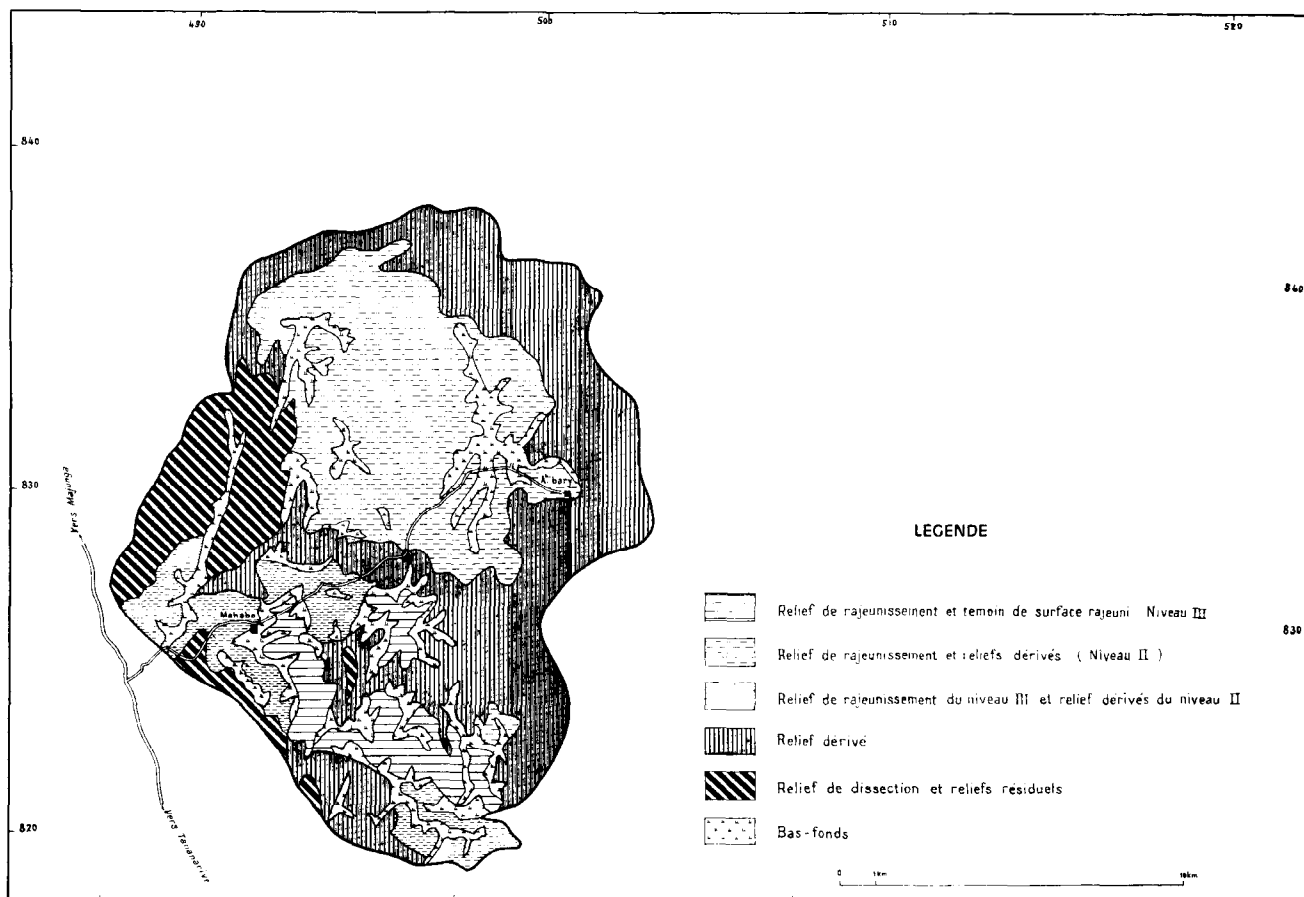
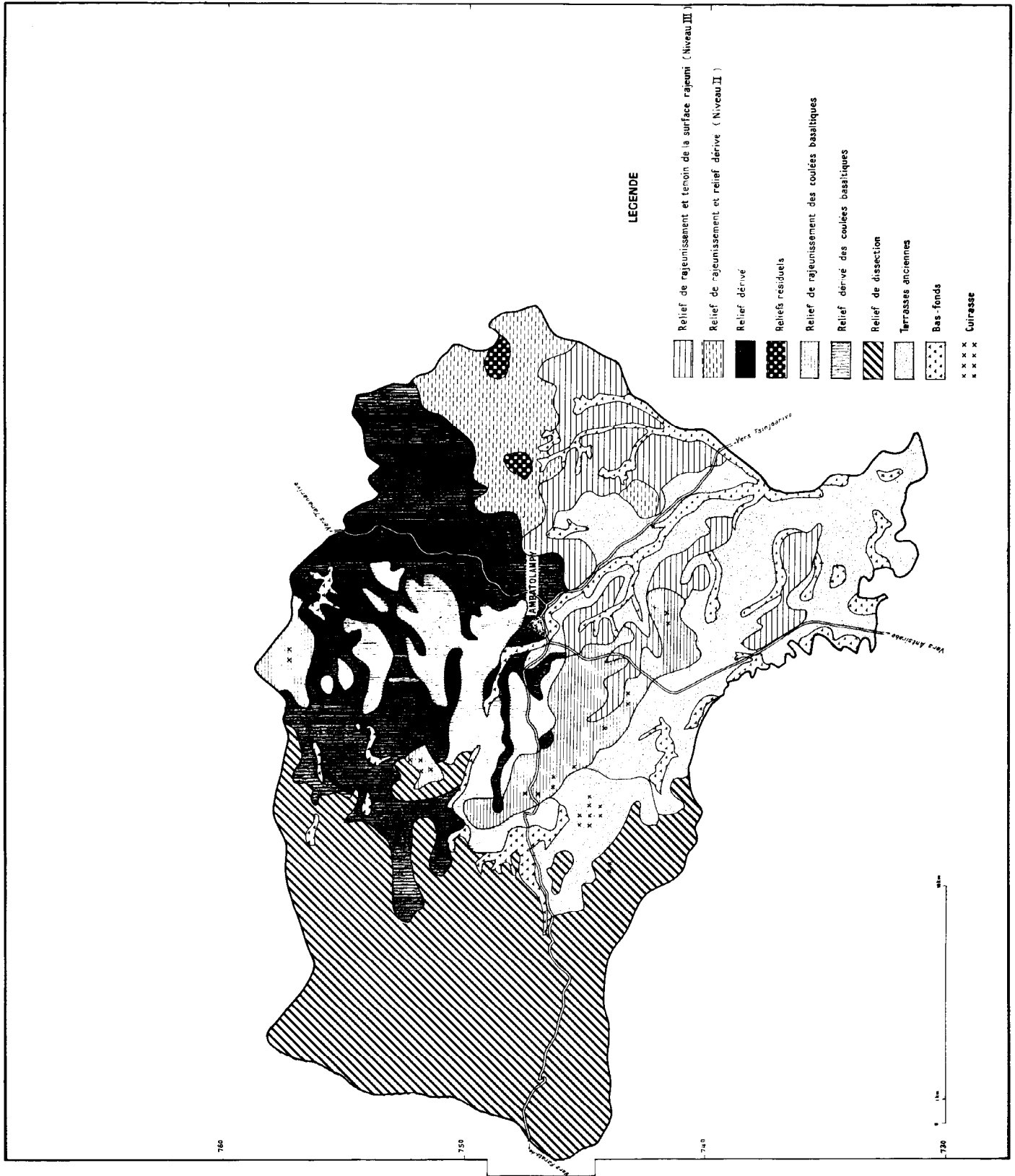


Fig. 5. — Schéma des types de reliefs.



Carte 1. — Région de Mahabo. Carte des types de reliefs.



Carte 2. — Région d'Ambatolampy. Carte des types de reliefs.