

**EXPLOITATION DES COMPTAGES DE MINÉRAUX LOURDS
PAR L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES
APPLICATION AUX FORMATIONS SUPERFICIELLES
DU SUD-OUEST DE MADAGASCAR**

M. SOURDAT* et J. MAHÉ**

* *Pédologue, Services Scientifiques Centraux ORSTOM,
70-74, route d'Aulnay, 93 BONDY*

** *Laboratoire de Géologie, Faculté des Sciences
33, rue Louis-Pasteur, 84 AVIGNON*

RÉSUMÉ

De nombreux comptages de minéraux lourds ont été effectués dans le cadre d'une étude morpho-pédologique du sud-ouest de Madagascar. Leur exploitation est réalisée par l'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.).

Soit n espèces minérales dont les grains sont comptés sur p prélèvements. Les valeurs obtenues déterminent les positions occupées par les points représentatifs des « variables » (espèces minérales) ou des « individus » (prélèvements), dans les espaces multidimensionnels à n et p dimensions. Ces espaces ne nous étant pas directement accessibles, l'A.F.C. leur substitue des « espaces factoriels » choisis de telle sorte que la déformation soit minimale. Elle superpose les espaces factoriels propres aux variables et aux individus et en offre des représentations simples, dans un espace d'ordre peu élevé. On apprécie alors directement les « distances » qui séparent les points : elles traduisent des degrés de similitude entre individus ou des degrés de corrélation entre variables et individus.

L'exploitation des diagrammes fournis par l'analyse est explicitée et commentée.

Une loi de répartition régionale des minéraux lourds se dégage des résultats : à chaque formation géologique correspond un cortège spécifique, exporté par l'érosion linéaire et dont on retrouve la trace en

aval, et un cortège résiduel, laissé en place sur les interfluves à l'issue d'une longue évolution.

Divers résultats d'intérêt local sont signalés : on discrimine par exemple les contributions respectives des résidus de la décarbonatation profonde et des épandages détritiques superficiels à la constitution des sols rouges des karsts. On constate par ailleurs que dans la plaine de Tuléar convergent des sables à hornblende, à grenat ou à zircon, respectivement héritiers du socle, des grès Karroo et des épandages d'interfluve ; au cours du Quaternaire, les influences de ces apports ont varié.

Par son exceptionnelle capacité d'extraction, l'A.F.C. tire des comptages de minéraux lourds un parti maximal et apparaît comme une méthode remarquablement adaptée à leur exploitation sous réserve que les données soient déterminées avec la plus grande précision.

Cet article développe la note présentée le 28.10.74 à l'Académie des Sciences.

ABSTRACT

The use of heavy-mineral counts using the Benzecri method (analyse factorielle des correspondances) as applied to surface formations in South-West Madagascar.

Many heavy-mineral counts have been carried out under a geomorphic and soil study of south-west

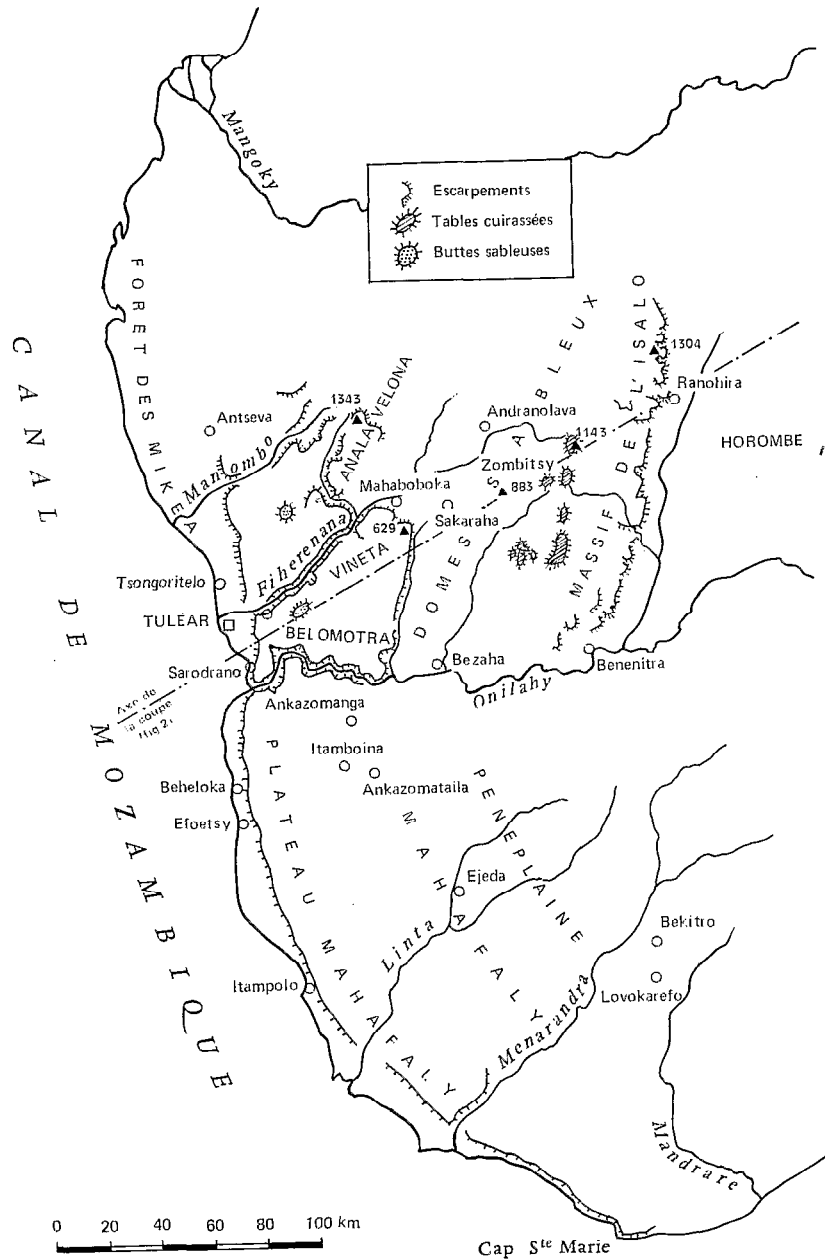


FIG. 1. — Le sud-ouest de Madagascar : carte de situation.

Madagascar. The data has been treated by the Benzecri method.

Using n species of mineral with sample grains taken from p sample collections: the values obtained determine the place of points representing "variables" (mineral varieties) or "individuals" (sample collections) in multi-dimensional space, using n and p dimensions. Since the spaces relative to each point are not directly accessible, the method substitutes instead "factorial space" chosen to make the deformation as small as possible. The factorial spaces proper to the variables and individuals are superimposed and may be represented simply within a space of small dimensions. The distances which separate the points may thus be appreciated directly: they translate degrees of similitude between individuals, or degrees of correlation between individuals and variables.

The use of diagrams resulting from the analysis is explained, and the diagrams are commented.

A law concerning the regional distribution of heavy minerals may be deduced from the results: there is a specified array of minerals corresponding to each rock formation, evacuated by linear erosion, with accumulated traces of transported material downstream; and there is another, residual, array left on the interfluves after a long period of geomorphic evolution.

Some of results are of significant local interest: for example, it may be seen that there is discrimination between the respective contributions of deep-seated decarbonatation residue and of surface detritus mobilised on aggraded slopes, both elements going towards the formation of karst-type red soils. It has also been noted that in the Tulear plain there converge sands containing hornblende, garnets, and zircon. These come respectively from the basement rocks, the Karroo sandstones, and the aggraded interfluves, and the part played by each of these elements has varied considerably throughout the Quaternary.

By the use of the benzecri method, an exceptional quantity of data has been drawn from heavy-mineral counts, and the method appears to be remarkably well adapted to this type of analysis, always supposing that the data is most carefully calculated and presented.

This article is an elaboration of the information presented to the Academy of Sciences, Paris, in a Note dated 28.10.74.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЁТОВ ТЯЖЕЛЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ ФАКТОРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА СООТВЕТСТВИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ К ПОВЕРХНОСТНЫМ ОБРАЗОВАНИЯМ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МАДАГАСКАРА

РЕЗЮМЕ

Многokrатные учёты тяжелых минералов были произведены в рамках морфо-почвенного изучения юго-западного Мадагаскара. Использование их проводится методом факториального анализа соответствий.

Предположим n видов минералов, зёрна которых учитываются на p пробах. Полученные значения определяют положения занятые точками представляющими «переменные» (минеральные виды) или «особи» (пробы) в многомерных пространствах с n и p размерами. Пространства эти не будучи непосредственно доступными, ФАС заменяет их «факториальными пространствами», выбор которых обеспечивает наименьшую деформацию. Он налагает свойственные переменным и особям факториальные пространства и даёт простые представления последних в пространстве небольшого порядка. После чего возможна непосредственная оценка «расстояний» между точками: они выражают степени подобия между особями или степени корреляции между переменными и особями.

Использование полученных анализом диаграмм объясняется и комментируется.

Результаты выявляют закономерность регионального распределения тяжелых минералов: каждому геологическому образованию соответствует специфическая свита, которая выносится линейной эрозией и следы которой встречаются вниз по течению, а также остаточная свита, сохранившаяся на месте, на междуречьях, в конце продолжительного развития.

Отмечаются несколько результатов местного значения: например различается соответственная роль остатков глубокой декарбонизации и обломочных поверхностных разбрасываний в образовании карстовых красных почв. Кроме того, в равнине Тулеар, наблюдается схождение песков с роговой обманкой, гранатом или цирконом, соответственно происходящими из основания, песчаников Карроо и междуречных разбрасываний; в течение четвертичного периода, величина этих отложений менялись.

По своей исключительной выводной способности, ФАС извлекает наибольшую выгоду из учётов тяжелых минералов и представляется особенно приспособлен-

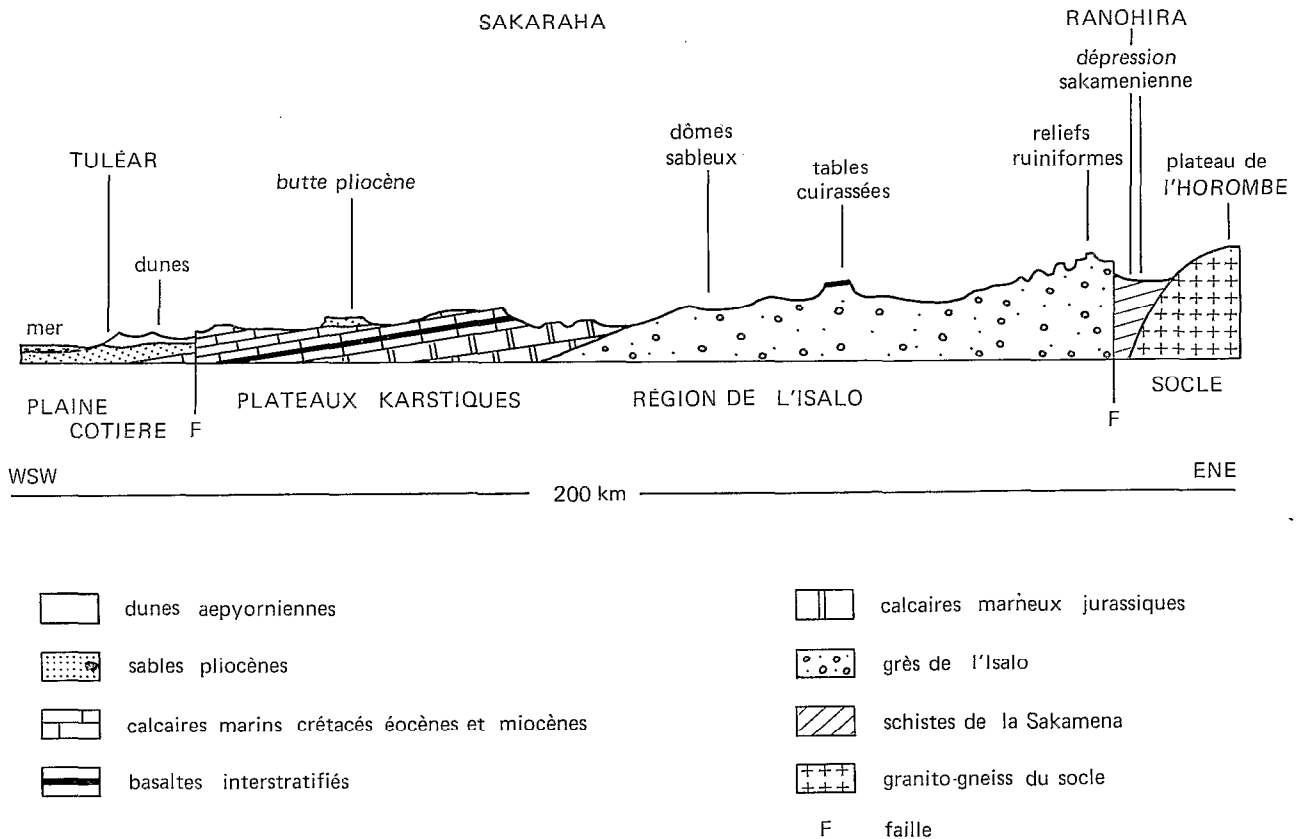


FIG. 2. — Coupe géologique schématique du bassin sédimentaire du Sud-Ouest.

ным к их использованию методом, под условием предельной точности в определении данных.

Настоящая статья развивает представленное 28-10-74 сообщение в Академию Наук.

LES FORMATIONS SUPERFICIELLES DU SUD-OUEST DE MADAGASCAR

Le cadre géographique et géologique (fig. 1 et 2)

Le sud-ouest de Madagascar est un bassin sédimentaire adossé au socle précambrien. Les dépôts, dont la série s'étend de la fin du Carbonifère à l'époque actuelle sont alternativement continentaux ou marins. Ils ont été nivelés et modelés en plusieurs épisodes au cours des cycles morphoclimatiques méso-tertiaire, fini-tertiaire et quaternaires (Dixey,

1958). Les principaux éléments du paysage s'abaissent, en pente régulière coupée d'accidents, de l'intérieur (1 304 m d'altitude dans l'Isalo) à la mer. Ce sont :

— le plateau de l'Horombe, représentant le socle arasé ;

— la dépression de Ranohira dans les schistes de la Sakamena, deuxième terme de la trilogie carboniféro-permo-triasique du Karroo ;

— les reliefs ruiniformes, tabulaires ou ondulés de l'Isalo, sur grès continentaux (le massif de l'Isalo donne son nom à la série géologique de l'Isalo, troisième terme du Karroo, équivalent africain et malgache du Permo-Trias) ;

— la dépression de Sakaraha, dans les calcaires marneux jurassiques ;

— les plateaux karstiques — ceux de Vineta, du Belomotra et du Mahafaly notamment — sur calcaires marins crétacés, éocènes ou miocènes ;

— les basaltes interstratifiés dans le Crétacé, soulevés et fracturés à Vineta et dans le massif de l'Analavelona ;

— les épandages sableux pliocènes, isolés en buttes-témoins sur les karsts ;

— les mêmes sables, étalés dans la plaine côtière ;

— la frange dunaire aepyornienne — l'Aepyornien étant le substitut malgache du Quaternaire ;

— les terrasses fluviales anciennes, rubéfiées, conservées dans les canyons et à leurs débouchés (non figurées).

Chaque cycle ayant remis en jeu l'héritage du précédent, la plupart des matériaux superficiels du Sud-Ouest ont été à plusieurs reprises remaniés (morphogénèse) ou altérés (pédogénèse) à l'occasion des alternances biorhexistatiques anciennes.

Les sols et le problème des « sables roux »

Dans ce contexte, il est peu de formations superficielles et en particulier de sols qui ne dérivent des « sables roux » ou ne soient contaminés par eux : on désigne sous ce nom la forme finale, rubéfiée, de matériaux détritiques qui ont été soumis, de l'époque Karroo à l'époque actuelle, à des reprises périodiques de remaniement et d'évolution. L'indétermination génétique qui résulte de la présence possible de ces matériaux, à l'origine de formations variées telles que les épandages d'interfluves, les couvertures des karsts, les terrasses fluviales et les dunes littorales, rend malaisée l'étude morpho-pédologique du Sud-Ouest. C'est pour lever cette indétermination et notamment pour mieux apprécier les contributions respectives des apports superficiels et des substrats à la formation des sols qu'une investigation minéralogique a été entreprise.

Le tropique du Capricorne passant à la latitude de Tuléar, le Sud-Ouest est soumis actuellement à un climat de type tropical à saisons contrastées, sub-humide à l'intérieur et sub-aride sur la côte mais on estime qu'au cours des périodes tertiaire et aepyornienne, des climats plus humides ont exercé leur influence : la présence de sols ferrallitiques en de nombreux points de la région en témoigne (Sourdat, 1969).

D'une façon générale, on distingue des sols « rouges » considérés comme anciens et des sols « non rouges » considérés comme récents ou actuels

(Sourdat, 1970*, 1972, 1973) — plus précisément post-flandriens (Mahé et Sourdat, 1972). La présence en un point d'un sol « non rouge » suppose le décapage du « sol rouge » préexistant ; sur calcaires, il y a lieu de penser qu'il s'agit d'un sol en place.

Les minéraux lourds des séries sédimentaires

Nous savons par Braxmeyer (1959) et Rerat (1965) que le sédimentaire malgache ne recèle qu'une petite quantité de minéraux lourds. Pour chaque étage on en trouve une espèce caractéristique ou deux, parfois trois. Les cortèges ont une assez grande diversification verticale et une extension horizontale importante qui autorise les corrélations. Cependant, cette extension constatée parallèlement à la limite du socle pourrait être moins satisfaisante dans la direction perpendiculaire car le transport réduit et modifie les cortèges.

Le Karroo présente des cortèges très monotones limités au zircon, au grenat, à l'apatite et à quelques minéraux accessoires.

Isalo II	<i>Grenat</i> , zircon et très faible quantité d'accessoires : tourmaline, monazite, staurotite et apatite.
Isalo I	<i>Zircon</i> , avec une quantité appréciable d'accessoires : <i>grenat</i> , tourmaline, monazite, staurotite et apatite.
Sakamena	<i>Grenat</i> , apatite avec plus ou moins d'épidote et de pyroxènes.

d'après BRAXMEYER (1959)

Les formations d'origine marine ne semblent pas avoir fait l'objet d'études spécifiques en raison sans doute du très faible taux de minéraux lourds qu'elles contiennent et de la faible participation qu'elles apportent, à l'échelle régionale, au stock minéralogique des formations superficielles.

Les minéraux lourds des formations superficielles et des lits de fleuves

Hervieu, qui a proposé en 1959 la première classification des « sables roux » indique que les « sables roux alluviaux » seraient presque totalement dépourvus de minéraux lourds ; les « sables roux d'épandage » n'en contiendraient que sous forme d'ilménite ;

res « sables roux dunaires » par contre, présenteraient, outre l'ilménite (et des feldspaths) une forte proportion de grenat. Il n'y aurait par ailleurs aucune différence entre les épandages qui bordent le socle, ceux des glaciers pliocènes et ceux des karsts.

Etudiant les alluvions du Mangoky, le même auteur (1965) note qu'à la sortie du massif ancien, le cortège du lit est largement dominé par l'amphibole (80 % de hornblende brune ou verte). Les autres espèces représentées sont dans l'ordre : zircon, grenat, monazite puis tourmaline, épidote, anatase, pyroxène, disthène, staurotide, sillimanite, zoïzite et corindon.

Le taux d'amphibole diminue en aval tandis que croît l'association zircon-grenat qui constitue 30 à 80 % des cortèges des lits des affluents issus du bassin sédimentaire ; le reste est constitué de monazite puis de tourmaline, rutile, apatite, épidote et staurotide.

Quant aux formations néogènes des régions côtières (Hervieu, 1965*) leur cortège, caractérisé par le zircon ne serait qu'une variante altérée du cortège à zircon, grenat et apatite du Karroo.

Des études plus complètes portant sur le complexe d'altération des zones cristallines et sédimentaires et sur les lits des fleuves de tout le versant occidental de l'île ont confirmé et généralisé ces données (Hervieu, 1968).

Minéraux lourds et problèmes pédogénétiques

Définir les degrés de ressemblance ou de parenté entre les sols, leurs matériaux originels, leurs substrats et leurs environnements, tel était le but poursuivi, but que les techniques de la sédimentologie permettent généralement d'atteindre. La comparaison granulométrique, morphoscopique ou minéralogique de matériaux divers n'est cependant aisée et fructueuse que si, à partir d'une source aussi riche en espèces minérales et aussi peu perturbée que possible — idéalement l'arène de désagrégation d'une roche ignée — des modifications ont été opérées par des agents bien caractérisés et n'interférant pas entre eux. Tel n'est pas le cas du sud-ouest de Madagascar auquel s'applique le propos restrictif de Tricart (1965) : « Les minéraux lourds qui se rencontrent dans les formations sédimentaires, y compris dans les formations détritiques, sont toujours remaniés et proviennent en fin de compte des roches ignées. Cependant, beaucoup de minéraux altérables disparaissent dans les milieux chimiquement actifs... Dans les formations qui se sont élaborées au cours de

trop nombreux remaniements successifs, seuls persistent les minéraux très peu altérables, sans originalité et qui ne rendent aucun service. »

Choix d'une méthode d'exploitation

Dans ces conditions, l'exploitation des comptages par les seules méthodes empiriques risquait de décevoir, ou de laisser trop de latitude à l'interprétation subjective. L'analyse factorielle des correspondances par contre, prenant en compte l'information globale tout en éliminant le facteur personnel, permet d'en tirer le meilleur parti.

L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES SON APPLICATION AUX MINÉRAUX LOURDS

La méthode

— Des comptages à la notion de « profil »

Les comptages de minéraux lourds ont été effectués selon une méthode classique. Après nettoyage, le prélèvement sableux est réduit à trois fractions dimensionnelles par tamisage ; les minéraux lourds contenus dans chacune de ces fractions sont extraits par décantation au moyen d'une liqueur dense ; les espèces transparentes sont identifiées et indirectement comptées sous le microscope polarisant, à partir de montages partiels représentatifs ; le nombre total des grains de chaque espèce de minéral lourd transparent, obtenu par addition, est enfin rapporté à 100 grains : il constitue le *pourcentage numérique*. Le poids total des minéraux lourds, opaques compris, rapporté au poids du prélèvement, constitue par ailleurs le *pourcentage pondéral* (Duplaix, 1958).

Pour chaque prélèvement — *observation* ou *individu* — on obtient donc une série de pourcentages numériques qui constituent les *variables*, et cette série de valeurs cumulées à 100 représente le *profil* de l'observation.

Le profil peut être matérialisé par un histogramme : celui-ci comporte autant de classes qu'il y a de variables et leurs valeurs sont portées en ordonnées.

— Limites de la comparaison empirique des profils

La comparaison empirique de deux profils — a fortiori d'un nombre élevé — ne peut retenir que les différences affectant un nombre restreint de

variables, considérées comme caractéristiques, et néglige les autres.

Une telle simplification, par laquelle on renonce à prendre en compte globalement l'ensemble des valeurs du profil, dénature l'information. Elle répond aux exigences de l'esprit humain qui ne perçoit concrètement qu'un espace comportant, au plus, trois dimensions ; la prise en compte globale du profil fait appel à un système d'ordre plus élevé qu'il appréhende malaisément.

— *L'analyse factorielle et la notion de « distance »*

On peut cependant concevoir des espaces multidimensionnels et en obtenir une représentation concrète par l'analyse factorielle.

Dans un *espace des variables* à n dimensions, construit sur n axes orthogonaux représentant les variables, chaque observation est représentée par un *point-observation* dont les coordonnées sur ces n axes sont les valeurs du profil. Dans cet espace multidimensionnel, les distances séparant deux points-observations sont directement liées à la ressemblance entre les profils concernés.

L'analyse factorielle revient à projeter les distances de l'espace multidimensionnel sur une série d'axes hiérarchisés, déterminés en fonction d'une déformation minimale. La combinaison des deux ou trois premiers axes factoriels ainsi définis, cumulant l'information, permet de matérialiser sous forme de diagrammes un espace concret (plan ou espace à trois dimensions), image la moins déformée de l'espace multidimensionnel.

Grâce à ces diagrammes, il devient possible de raisonner sur les similitudes, en fonction des distances entre points-observations.

— *Intérêt de l'analyse factorielle des correspondances*

L'intérêt majeur des analyses factorielles provient de ce qu'elles exploitent la réversibilité des observations et des variables.

Par analogie avec le profil d'une observation à n variables, on peut définir le profil d'une variable à p dimensions. A l'*espace des variables* on peut faire correspondre un *espace des observations* à p dimensions où chaque variable est représentée par un *point-variable* dont les coordonnées sur les p axes orthogonaux correspondant aux p observations, sont les valeurs du profil de chaque variable. Il est possible de projeter simultanément sur les mêmes axes

factoriels l'espace des variables et l'espace des observations.

La réversibilité entre observations et variables est exploitée au mieux par l'analyse factorielle des correspondances (Benzecri, 1973) pour laquelle les distances entre points-variables et points-observations sont significatives sur les diagrammes factoriels.

Deux points-observations sont d'autant plus *voisins* que les deux individus sont plus *semblables* suivant l'ensemble des valeurs considérées.

Deux points-variables sont d'autant plus *rapprochés* que ces deux variables sont plus étroitement *liées* dans leurs variations chez l'ensemble des individus considérés.

Un point-observation et un point-variable sont d'autant plus voisins que l'individu présente, pour cette variable, une valeur relativement élevée (1).

L'analyse factorielle des correspondances a déjà fait ses preuves en géologie. Hein (1974) a testé méthodiquement sa validité dans le domaine des minéraux lourds. Cependant, cette application, effectuée sur des matériaux antérieurement étudiés de manière empirique, n'illustre qu'imparfaitement l'intérêt et la portée de l'AFC, faute d'aller significativement au-delà des résultats précédemment acquis.

Il a paru plus probant de s'intéresser à un matériel nouveau dont l'exploitation par les méthodes classiques s'avérait particulièrement difficile.

Préparation des données

— *Composition de l'échantillon de base*

291 individus ont été réunis. Ils se répartissent de la manière suivante :

Socle et lits de fleuves (2)	4 individus
Matériaux de l'Isalo	108 —
Sols sur calcaires	58 —
Sols sur basaltes	5 —
Formations néogènes et épandages sableux pliocènes	29 —
Terrasses rubéfiées	6 —
Dunes et cordons littoraux	81 —

(1) Les points-variables sont les barycentres des points-observations et réciproquement.

(2) Le prélèvement des sables des fleuves a été effectué par J. Picard (Station Marine d'Endoumé) que nous remercions.

Le type de gisement ne préjugant pas de la composition minéralogique d'un individu, nous n'avons pas corrigé les disproportions propres à cette composition. La réduction a priori des groupes les mieux représentés eût entraîné une intervention arbitraire et une perte d'information.

15 espèces minérales ont été comptées. L'espace multidimensionnel global est donc constitué de 291 individus et 15 variables.

— Codage des informations

Les individus ont été codés par une lettre suivie de deux chiffres (ex. : A34), et les variables par un monogramme de trois lettres :

AMS amphiboles sodiques	EPI épidote
PRX pyroxènes	ZRC zircon
HRN hornblendes	TRM tourmaline
AND andalousite	RUT rutile
SIL sillimanite	CRN corindon
DST disthène	MNZ monazite
STR staurotide	ANA anatase
GRN grenat	(PCP) pourcentage pondéral

— Composition des échantillons traités

La démarche est d'obtenir une image de *répartition globale* de valeur régionale, puis de reprendre séparément certains nuages de points-observations, en vue d'une différenciation plus fine à caractère local ou spécifique.

Dans un premier temps, il était souhaitable de ne pas projeter plus d'une centaine de points sur chaque diagramme, afin qu'ils restent lisibles. L'échantillon de base a donc été divisé en quatre parties. Sur les diagrammes obtenus, il a suffi de démarier les individus, superposés ou très voisins, pour sélectionner les individus représentatifs.

Dans un deuxième temps, un *échantillon global réduit* formé de 110 individus représentatifs a été sélectionné en vue du diagramme de *répartition globale régionale*.

Enfin, des *échantillons partiels* ont été constitués à partir des individus qui se projetaient en nuages denses sur les premiers diagrammes ou répondaient à des qualifications particulières (dunes, karsts, etc.).

— Variables et individus marginaux

Il est superflu, voire néfaste de maintenir, dans les échantillons soumis à l'analyse factorielle, des

variables ou des individus dont la singularité est évidente. Si en effet des taux exceptionnels de l'une ou l'autre des variables sont atteints par un très petit nombre d'individus et par eux seuls, ou si une variable n'est représentée que dans un très petit nombre d'individus, il en résulte que les points-variables et les points-individus associés sont exagérément excentrés tandis que le reste de la distribution est concentré dans la partie opposée du diagramme.

Ainsi, 9 individus seulement sur 291 contenaient des amphiboles sodiques sans qu'aucun critère géographique, pédologique ou autre ne permette d'interpréter leur association : dans ces conditions, il a semblé opportun d'écarter AMS dont la prise en compte perturbait exagérément l'équilibre des autres variables. De même, lors du traitement d'échantillons partiels, d'autres variables ont pu être écartées lorsqu'elles étaient absentes ou trop peu représentées dans ces lots.

Nous n'avons pas non plus retenu au nombre des variables le pourcentage pondéral des minéraux lourds auquel les auteurs n'accordent que peu de signification. Nous avons pu noter sur les tableaux de données que 13 individus seulement présentaient des valeurs de PCP supérieures à 8 % :

— 6 étaient des sables dunaires et reflétaient les concentrations accidentelles communes aux plages de Madagascar (Behier, 1954) ;

— 5 étaient des sols sur basaltes, riches en magnétite.

Pour 25 individus, PCP était inférieur à 0,5 % : 18 représentaient les matériaux de l'Isalo, 3 les calcaires et 2 les dunes.

Il y avait également lieu d'écarter les individus suivants :

— un sol vertique sur basaltes de la région de Vineta en raison d'une teneur exceptionnelle en pyroxènes (PRX 94 %) ; de même un sol brun-eutrophe sur basaltes (PRX 42 %) ;

— deux résidus de décarbonatation de calcaires de Vineta, excentrés, l'un de par le grenat (74 %), l'autre de par la sillimanite (19 %) et l'andalousite (10 %) ;

(1) Au sein d'un échantillon donné, un taux de 10 % pour une variable peut être aussi marginal qu'un taux de 90 % pour une autre et l'on ne peut éliminer un individu qu'en connaissant les fourchettes de valeurs de cet échantillon.

— un sable de la « grande dune roux-rouge » d'Amboasary (extrême-sud), excentré de par l'épidothé (67 %) (1) p. 46.

La singularité de ces individus étant manifeste, les corrélations entre les types de gisements et les compositions minéralogiques exceptionnelles s'établissent d'elles-mêmes.

ANALYSE DES DIAGRAMMES

Exploitation de l'échantillon global réduit Répartition des cortèges minéralogiques du Sud-Ouest

124 points sont projetés sur les premiers axes factoriels : 110 individus et 14 variables. Les pourcentages d'information recueillis sur les axes factoriels sont les suivants :

axe 1	48,8 %
axe 2	12,0 %
axe 3	8,5 %

Distribution des points-variables

Le plan factoriel (I,2) montre, suivant l'axe I, une opposition entre les 3 points représentatifs PRX, HRN et GRN, à gauche du diagramme, et 8 points groupés à l'extrême-droite, le point SIL, et dans une moindre mesure les points EPI et ANA, occupant une position intermédiaire (fig. 3a).

Suivant l'axe 2, le premier groupe de variables se dissocie selon le gradient PRX HRN --- GRN ; le second groupe par contre s'étale relativement peu. La distribution est donc ordonnée selon 3 pôles principaux : PRX HRN --- GRN --- le reste.

Le plan factoriel (I,3) montre que selon l'axe 3 les variables du premier groupe sont resserrées tandis que celles du second groupe s'étaient (fig. 3b).

Plus précisément, on constate que les 8 variables qui étaient étroitement associées dans la partie droite du premier plan factoriel se séparent ici nettement et s'ordonnent en gradient : la triade MNZ-AND-CRN constitue l'un des pôles ; le couple RUT-ZRC reste en position centrale : la triade STR-DST-TRM se détache en position très excentrée.

Le couple intermédiaire EPI-ANA, légèrement décalé selon l'axe I, se situe à la hauteur du couple RUT-ZRC selon l'axe 3.

Les points variables occupent donc approximativement dans l'espace factoriel à trois dimensions

un tétraèdre dont les sommets sont les pôles HRN - GRN - MNZ - TRM. Les arêtes de ce tétraèdre matérialisent des gradients entre ces pôles (Sourdat et Mahé, 1974).

Distribution des points-observations

Les points-observations se répartissent schématiquement suivant deux arêtes orthogonales opposées de ce tétraèdre.

— *Discrimination selon l'axe I.* En se référant au plan (I,2) on constate que les points-observations se répartissent, suivant l'axe I, en deux grands ensembles de part et d'autre de l'origine.

Le premier comporte 39 individus largement dispersés et englobe les points-variables HRN, PRX et GRN : nous le notons *G*. Il contraste avec le second qui comporte les 71 autres individus, étroitement groupés, et qui englobe la majorité des autres variables : nous le notons *Z*.

Le collationnement des individus permet de constater que le premier grand ensemble *G* regroupe la quasi-totalité des matériaux fluviatiles et dunaires tandis que le grand ensemble *Z* regroupe la quasi-totalité des matériaux d'épandages d'interfluyes : ceux de l'Isalo, des karsts et de la plaine côtière.

Discrimination selon l'axe 2. Suivant l'axe 2, le nuage *G* se répartit selon le gradient PRX-HRN --- GRN avec, pour les points situés du côté du pôle GRN une tendance à se différencier selon un gradient GRN --- ZRC, etc. Ce même gradient amorce un étalement des points-observations du nuage *Z*.

Le grand ensemble G : en associant les projections des deux premiers axes, on distingue dans le plan (I,2), d'une part deux nuages *G1* et *G2* disposés suivant le champ du dipôle PRX-HRN --- GRN, d'autre part, deux nuages *G3* et *G4* plus ou moins repoussés par le pôle ZRC, etc., perpendiculairement au dipôle ci-dessus.

L'ensemble G1 : le collationnement des 12 points-individus montre que cet ensemble regroupe des matériaux originaires du socle, en transit par les fleuves et la dérive littorale puis rejetés à la côte sous forme de dunes, à savoir : un sol sur leytinites de Bekitro, un prélèvement du lit de l'Onilahy, des dépôts dunaires de l'Aeypornien ancien, prélevés à Efoetsy ou à Tuléar, et un cas particulier — sol brun-calcaire.

Le report aux tableaux de données brutes confirme que les cortèges de l'ensemble *G1* sont dominés

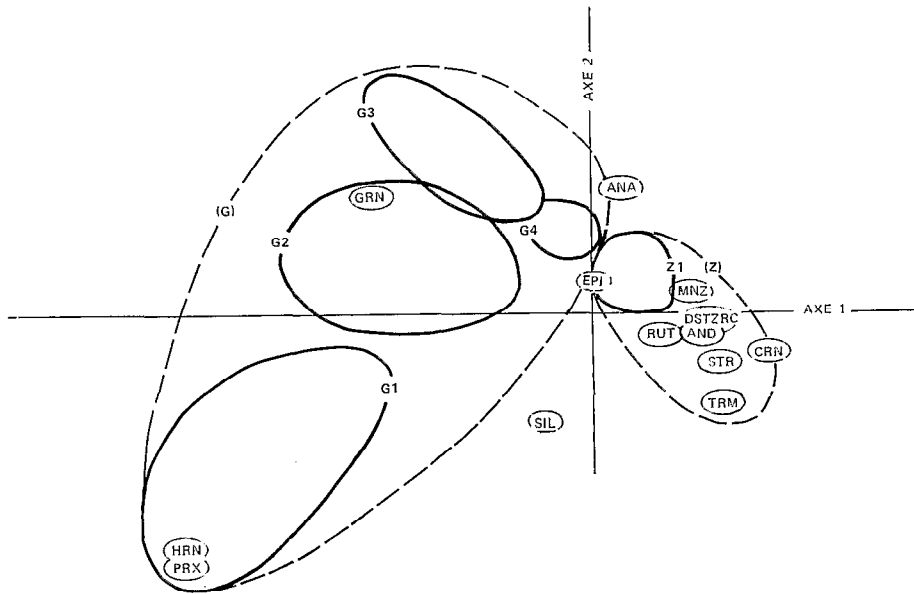


FIG. 3a. — Projections des points-variables et des ensembles de points-individus dans le plan factoriel (1, 2).

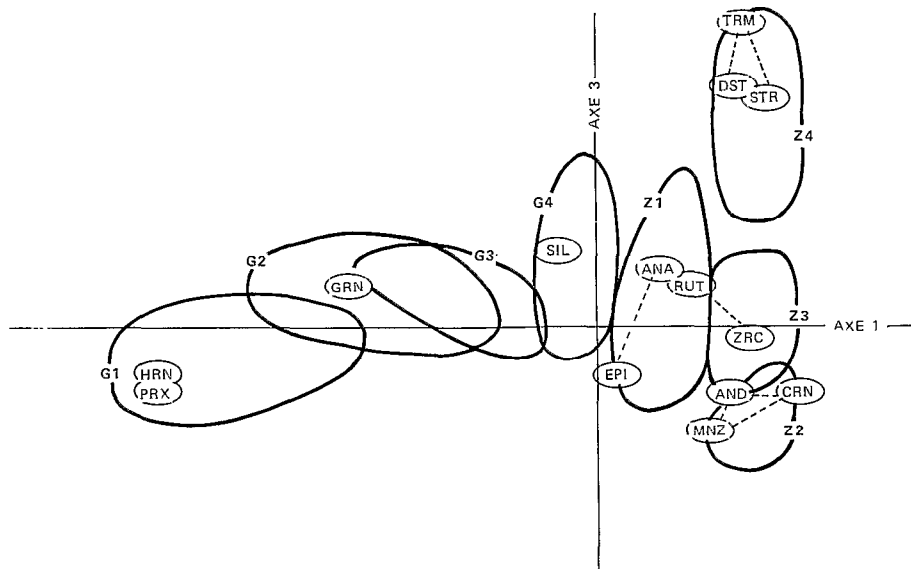


FIG. 3b. — Projections dans le plan factoriel (1, 3).

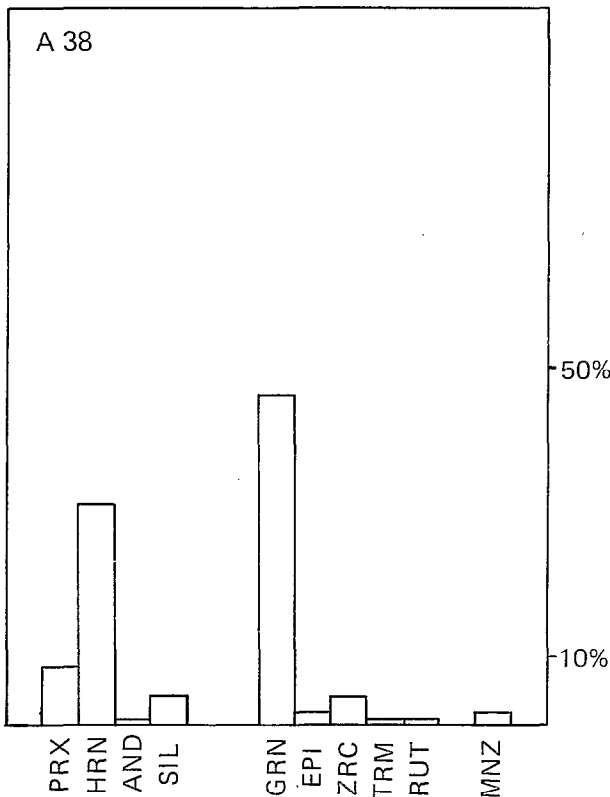


FIG. 4. — Lit de l'Onilahy - ensemble G1.

numériquement par le grenat mais caractérisés surtout par l'importance relative du couple hornblendes-pyroxènes (fig. 4). On peut constater que les taux de pyroxènes sont inconstants, et négligeables en valeur absolue par rapport à ceux de hornblendes. Ils sont néanmoins significatifs : les ensembles G(3,4) et Z(1,2,3,4) n'en contiendront presque plus. On vérifie également que la sillimanite est inconstante et généralement peu significative. Les minéraux caractéristiques du grand ensemble Z (ZRC RUT EPI MNZ TRM) sont minoritaires et d'autres ne sont pas représentés (AND DST STR CRN ANA).

L'ensemble G2 : cet ensemble regroupe 11 individus représentatifs des dépôts dunaires de l'Aépyornien (ancien, moyen et récent), prélevés à Tuléar et à Tsongoritelo.

Le report aux données confirme la prédominance croissante du grenat par rapport au couple hornblendes-pyroxènes. Les minéraux caractéristiques de Z (zircon, etc.) voient leurs taux augmenter légè-

rement tandis que parmi les accessoires, l'andalousite et la staurotide sont représentées. La sillimanite reste inconstante (fig. 5).

L'ensemble G3 : il rassemble 11 individus, tous représentatifs de formations liées au Fiherenana : lit du fleuve, terrasses rubéfiées anciennes, dunes riveraines et cas particuliers — sols bruns-calcaires — dont nous reparlerons.

Les cortèges sont nettement dominés et caractérisés par le grenat. Les faibles taux de hornblendes et l'absence fréquente de pyroxènes confirment l'influence moindre du pôle HRN-PRX tandis que les taux croissants de minéraux du groupe Z — zir-

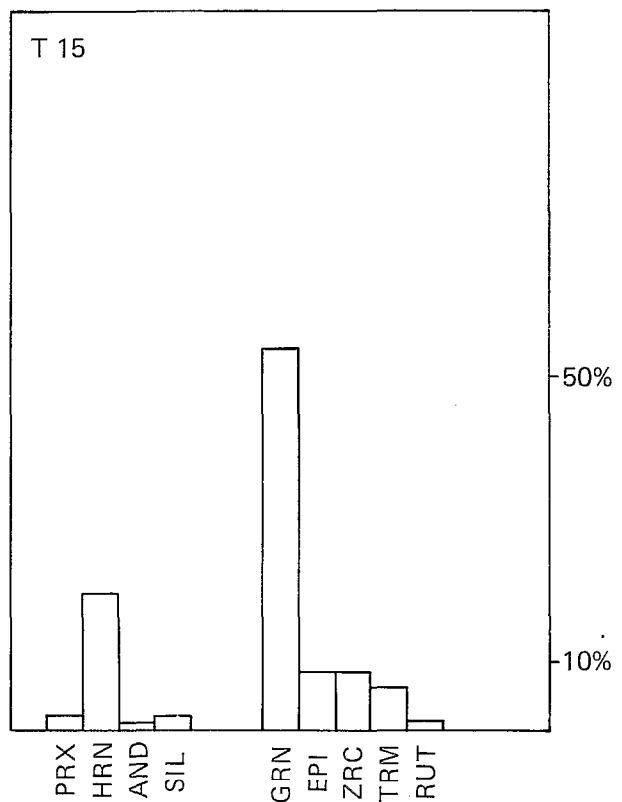


FIG. 5. — Cordon littoral proche de Tuléar - ensemble G2.

con et épidote surtout — traduit l'alignement des points-observations dans le prolongement du pôle ZRC, etc. (fig. 6). Parmi les accessoires de ce groupe, l'anatase prend un peu d'importance.

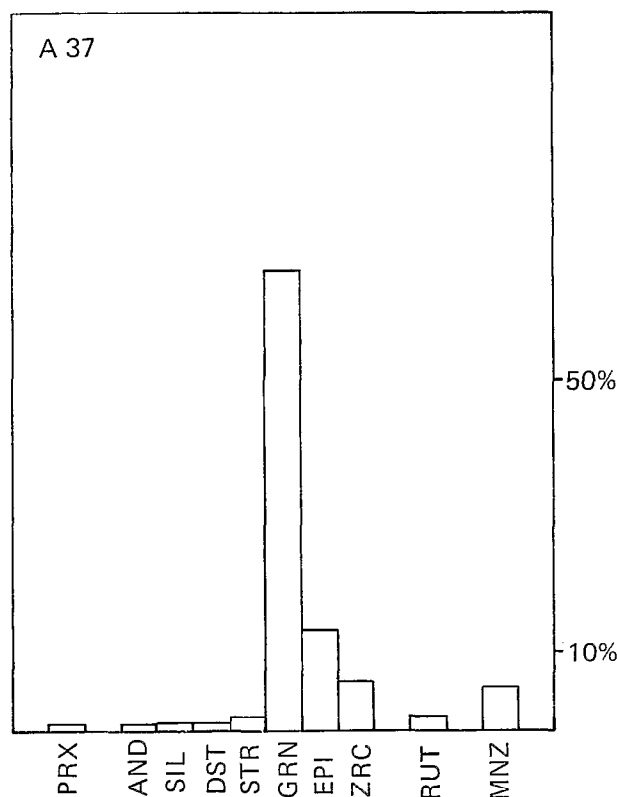


FIG. 6. — Lit du Fiherenana - ensemble G3.

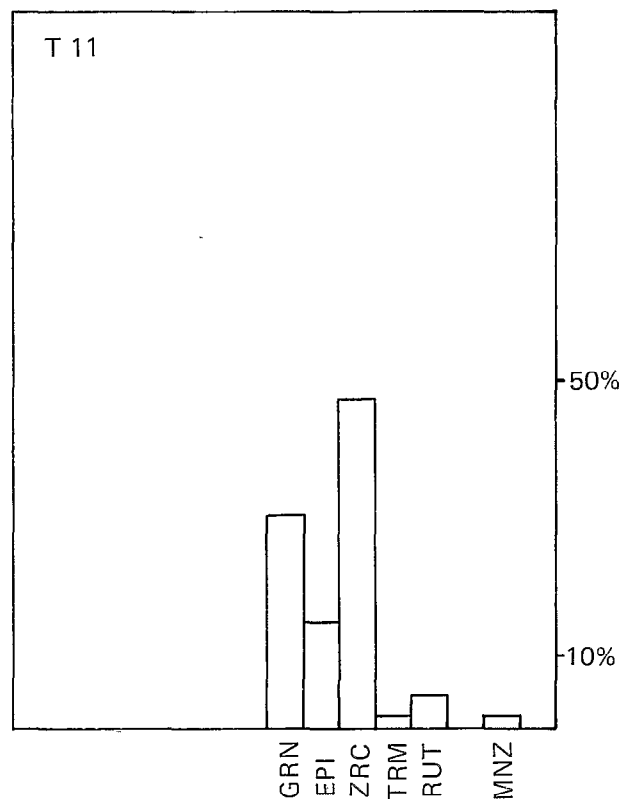


FIG. 7. — Sable roux d'épandage à Ifaty - ensemble G4.

L'ensemble G4 : il ne rassemble que 5 individus divers — dunes de Tuléar, épandage riverain du Fiherenana — et établit une transition entre les matériaux du littoral et ceux de l'intérieur.

Le groupe à zircon prend le pas sur le grenat. L'anatase atteint des taux relativement élevés (5 %) mais très inconstants. Les hornblendes se font rares et les pyroxènes sont absents (fig. 7).

Le grand ensemble Z : par la seule observation du plan factoriel (I,2), on peut isoler un ensemble que nous noterons Z1, situé au-dessus de l'axe I, du reste du grand ensemble Z situé au-dessous. L'individualisation de Z1 est déterminée par une position intermédiaire entre les pôles GRN et ZRC, etc., dans le champ des points-variables ANA et EPI.

L'ensemble Z1 : il rassemble 17 individus parmi lesquels le lit de la Manombo, un sol de doline

du Mahafaly, deux sols de l'Isalo et surtout treize représentants des calcaires de Vineta ou des horizons profonds — proches du calcaire — des sols rouges de ce plateau karstique.

Le report aux données confirme que c'est le dernier ensemble dans lequel se retrouvent encore des taux importants de grenat. *Les cortèges sont dominés numériquement et caractérisés par le zircon, suivi du grenat et de l'épidote.* Les taux d'anatase ne sont notables que par rapport à leur quasi-nullité dans les autres ensembles (fig. 8).

Discrimination selon l'axe 3. L'observation du plan factoriel (I,3) met remarquablement en évidence le fait que les ensembles G(1,2,3,4), qui étaient bien différenciés dans le premier plan factoriel sont très peu dispersés selon l'axe 3 (à l'exception d'un point très excentré de G4, épandage riverain du cours moyen du Fiherenana). L'ensemble Z1 est modérément dispersé, de part et d'autre de l'axe I ; cette

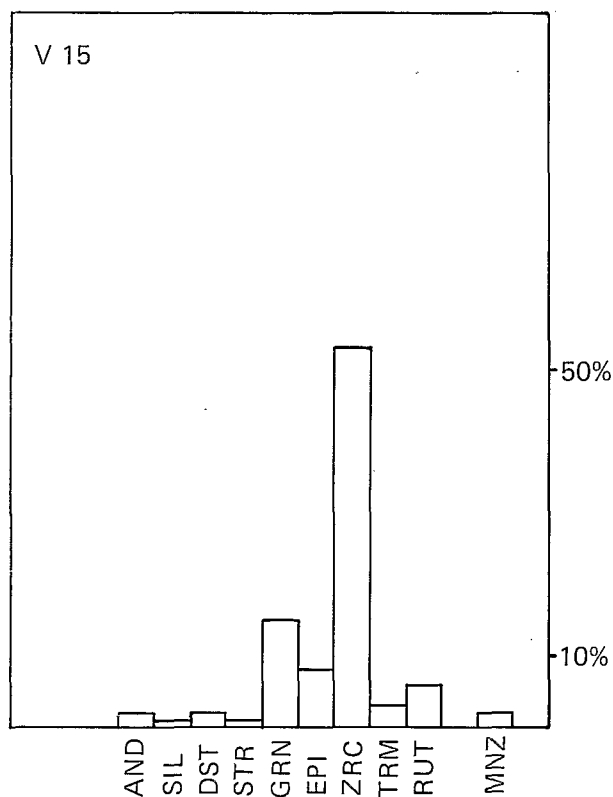


FIG. 8. — Horizon profond d'un sol rouge sur calcaire - ensemble Z1.

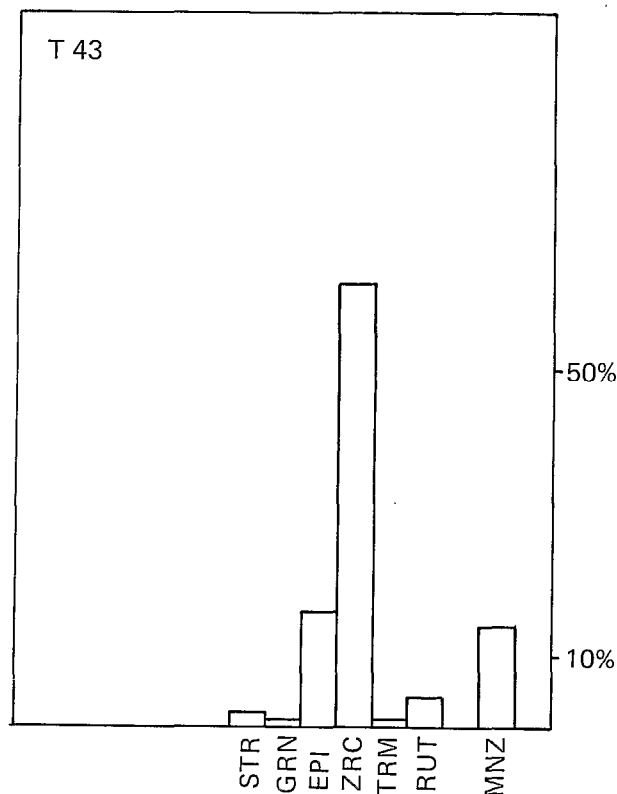


FIG. 9. — Sable d'épandage pliocène - ensemble Z2.

tendance se trouve pleinement développée au niveau du groupe Z résiduel, largement étalé suivant le gradient MNZ-AND-CRN --- ZRC-RUT --- STR-DST-TRM.

Trois ensembles s'individualisent assez nettement : ils sont notés Z(2,3,4).

L'ensemble Z2 : il regroupe 15 individus dont 6 représentants des sols rouges à substrat calcaire d'Antseva, 8 représentants des buttes-témoins pliocènes sur karst ou des horizons supérieurs de sols rouges avoisinants, et une terrasse ancienne de l'Onilahy.

Pyroxènes, hornblendes et grenats sont quasi absents. *Les cortèges* sont dominés par le zircon, associé à des taux notables mais variables de monazite et d'épidote ainsi qu'à des taux faibles mais assez constants de rutile. Andalousite, tourmaline et staurotide sont représentées. Les autres minéraux sont absents ou exceptionnels (fig. 9).

L'ensemble Z3 : parmi les 29 individus de cet ensemble, on reconnaît 15 représentants des horizons supérieurs de sols rouges à substrat calcaire de Vineta, 10 représentants des sols de l'Isalo et 4 représentants d'épandages néogènes.

Les cortèges sont dominés par le zircon et caractérisés par un certain équilibre entre épidote, rutile et monazite (fig. 10).

L'ensemble Z4 : les 10 individus regroupés par Z4 appartiennent à l'Isalo.

Les cortèges, dominés numériquement par le zircon, sont caractérisés par les taux relativement forts de tourmaline que suit le rutile. Le disthène, la sillimanite et la staurotide sont bien représentés (fig. 11).

Les informations d'intérêt morpho-pédologique fournies par cette analyse sont précisées par l'exploitation d'échantillons partiels.

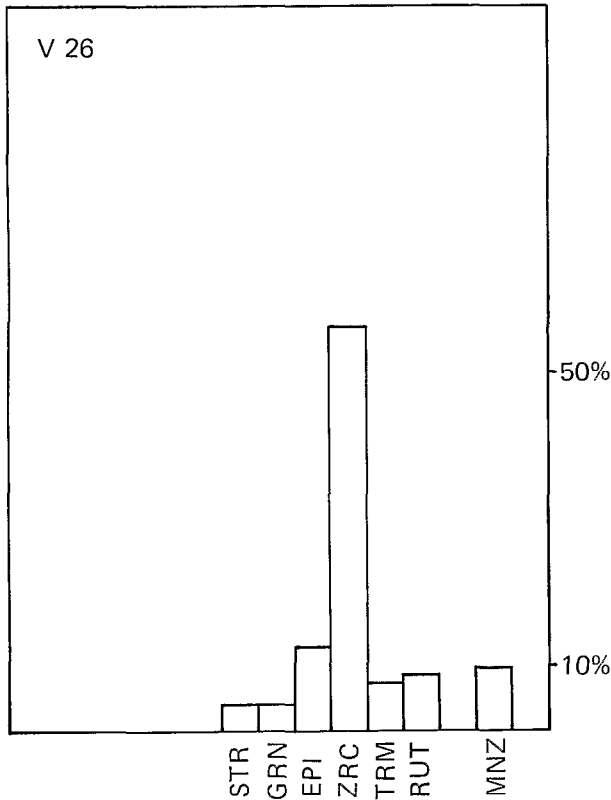


FIG. 10. — Horizon superficiel de sol rouge sur calcaire - ensemble Z3.

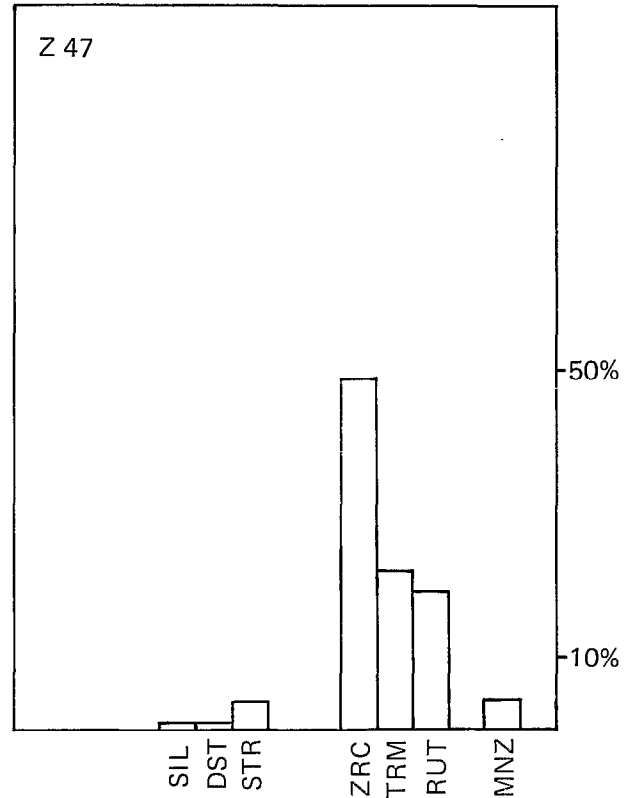


FIG. 11. — Sol de l'Isalo ruiniforme - Z4.

Exploitation d'échantillons partiels

Nous avons traité à part 4 échantillons partiels sélectionnés en fonction de leur intérêt propre : matériaux de l'Isalo, matériaux des karsts, ceux des régions littorales et sublittorales d'Antseva et du Mahafaly et enfin les dunes.

Sans détailler l'analyse des diagrammes, nous rapporterons succinctement les principaux résultats obtenus.

Matériaux de l'Isalo

101 individus et 12 variables ont été retenus. La position centrale des variables ZRC, RUT et AND traduit leur présence très constante dans les cortèges tandis que les positions excentrées de TRM, EPI et MNZ traduisent leur variabilité. Des corrélations se dessinent par ailleurs entre TRM, HRN et STR d'une part, entre DST et SIL d'autre part.

En valeur absolue le zircon est toujours largement dominant, suivi selon les cas de la tourmaline, de l'épidote, de la monazite ou du rutile.

Les points s'ordonnent en 4 nuages interpénétrés, englobant chacun marginalement le groupe constant ZRC-RUT-AND situé au centre de l'espace. EPI, MNZ et TRM attirent trois d'entre eux à la périphérie et repoussent le quatrième.

Le pointage des individus fait apparaître qu'à cette répartition correspondent 4 ensembles de nature géologique ou pédologique.

Le cortège à tourmaline caractérise la zone d'affleurement orientale de l'Isalo I, autrement dit l'Isalo ruiniforme. Cet ensemble était représenté en Z4 dans l'échantillon global (fig. 12a).

Les cortèges à épidote et à monazite caractérisent les affleurements occidentaux de l'Isalo II, c'est-à-dire les Dômes sableux d'Andranolava, du Zombitsy

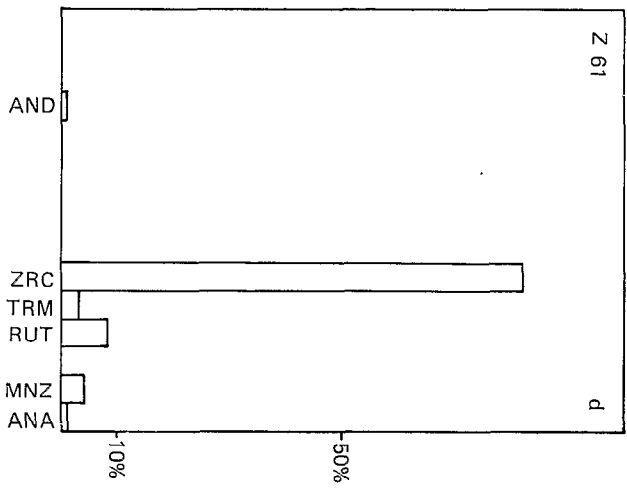
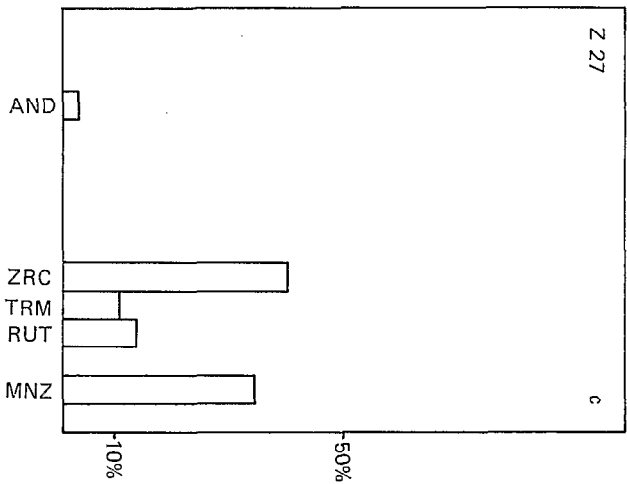
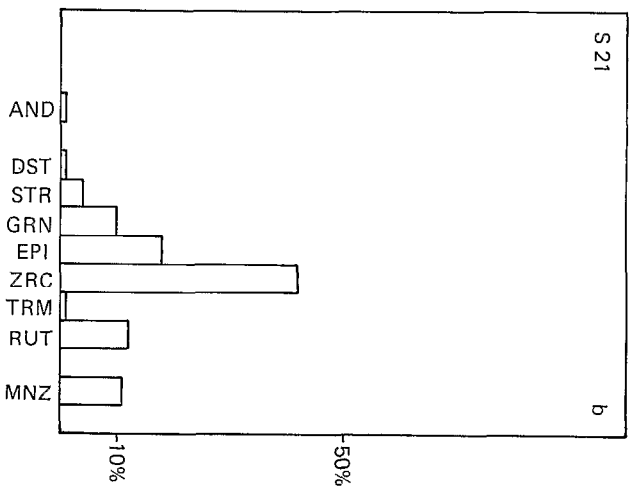
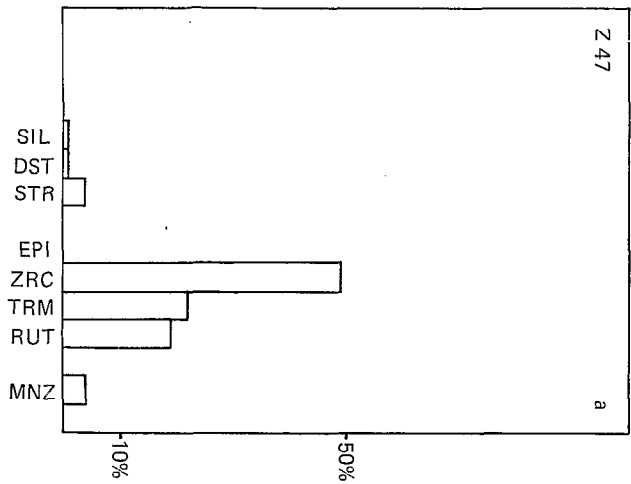


Fig. 12. — Cortèges minéralogiques des matériaux de l'Isalo.

a) Sol de l'Isalo ruiniforme - dominante relative TRM.
 b) Sol des dômes sableux - dominante relative EPI.
 c) Sol des dômes sableux - dominante relative MNZ.
 d) Sol de l'Isalo tabulaire - dominante absolue ZRC.

et de Bezaha ainsi que les sédiments de l'Isalo I observés à Benenitra. Les gisements de ces cortèges étant très mêlés, on peut penser qu'ils sont liés à des alternances stratigraphiques. Ces ensembles correspondent à Z1 et Z2 (fig. 12b et 12c).

Un cortège, réduit par l'altération des minéraux les moins résistants à la dominance presque exclusive du zircon, caractérise les matériaux ferrallitiques et particulièrement ceux de l'Isalo tabulaire. Il correspond à Z3 (fig. 12d).

On voit donc se dessiner dans la région de l'Isalo quelques-unes des distinctions que nous avons déjà reconnues au niveau de l'échantillon global régional. Ces similitudes indiquent le rôle privilégié tenu par l'Isalo en tant que source des matériaux détritiques plio-aepeyorniens.

Matériaux des karsts

51 individus prélevés à Vineta, sur le Belomotra et à Antseva ont été retenus avec 13 variables.

La position centrale des variables ZRC et RUT traduit leur présence constante — avec nette prédominance de ZRC — tandis qu'une constellation GRN-TRM-STR-ANA, la variable EPI et la variable MNZ constituent trois pôles d'attraction divergents. De plus, un groupe SIL-AND est très excentré au-delà de MNZ en raison des valeurs, exceptionnelles et très liées mais inconstantes, atteintes par ces variables.

Les nuages s'interpénètrent largement mais le pointage révèle un gradient primordial selon l'axe 1 entre les individus liés au substrat calcaire et les individus liés à la couverture sableuse pliocène. Les premiers sont caractérisés par la constellation à grenat associée au zircon qui domine ; le couple sillimanite-andalou-site y est représenté. Leur ensemble est homologué de Z1. Les seconds sont caractérisés par l'épidote ou la monazite, également associées au zircon dominant, et par l'absence de minéraux accessoires. Leur ensemble correspond à Z2 mais au lieu d'être concentré comme sur le diagramme de l'échantillon global, il est largement étalé entre les pôles EPI et MNZ, selon l'axe 2.

Les points dispersés entre les deux pôles principaux représentent des horizons plus ou moins profonds de « sols rouges », plus ou moins tributaires du substrat calcaire ou de la couverture sableuse selon leur degré propre d'allochtonie ou d'autochtonie. Leur ensemble est homologué de Z3.

Les histogrammes (fig. 13) illustrent la diversité de ces cortèges et manifestent, en ce qui concerne

le cortège résiduel de la décarbonatation (fig. 13c) l'importance discriminatoire des minéraux accessoires (AND SIL DST STR TRM) qui accompagnent le grenat.

L'existence de cortèges à épidote et à monazite parmi les matériaux d'épandage pliocènes et les sols qui en dérivent rappelle la coexistence de ces cortèges, observée dans les matériaux des Dômes sableux de l'Isalo et attribuée à des alternances stratigraphiques : on retrouve ici les traces d'une filiation directe.

Matériaux de la région d'Antseva et du plateau Mahafaly.

37 individus et 13 variables représentent des matériaux d'origines assez dissemblables et les diagrammes offrent l'exemple d'une discrimination exceptionnellement nette. Quatre groupes de variables, bien cohérents dans l'espace factoriel, se trouvent projetés en constellations bien séparées qui caractérisent des formations distinctes.

Un sol peu profond sur leptynites, prélevé à Bekitro au centre de la grande pénéplaine mahafaly, les sables des lits de l'Onilahy et du Fiherenana et des dunes littorales aepeyorniennes prélevées entre Itampolo et Beheloka (entre la Linta et l'Onilahy) forment un ensemble très excentré sur l'axe 1, caractérisé par GRN HRN PRX. Le regroupement de ces individus manifeste les relations établies entre le socle et les formations littorales par le transport fluvial.

Des « sables roux » sur affleurements néogènes des zones du Lavokarefo, d'Edjeda, d'Ankazomataila et Itamboina d'une part, et des sols rouges de dolines de la zone des « clairières » d'autre part, forment un deuxième ensemble caractérisé par RUT et EPI, excentrés sur l'axe 2 et associés dans les cortèges au groupe constant ZRC-TRM. Ce regroupement illustre de nouveau les relations existant entre les sédiments détritiques continentaux et la couverture des karsts. Il traduit par ailleurs une richesse en rutile propre à la région Mahafaly.

A l'autre extrémité de l'axe 2, c'est la constellation MNZ-SIL-AND qui, associée à un noyau constant ZRC-ANA-DST-STR dominé par ZRC, caractérise les matériaux de la zone d'Antseva. Le lit de la Manombo s'apparente à cet ensemble. On remarque que les variables discriminantes MNZ-SIL-AND sont rigoureusement absentes des deux premiers ensembles qui échappaient de par leur situation à la contamination des matériaux sédimentaires continentaux. Dans l'extrême-sud en effet, les calcaires marins fossilisent le socle sans interposition du Kar-

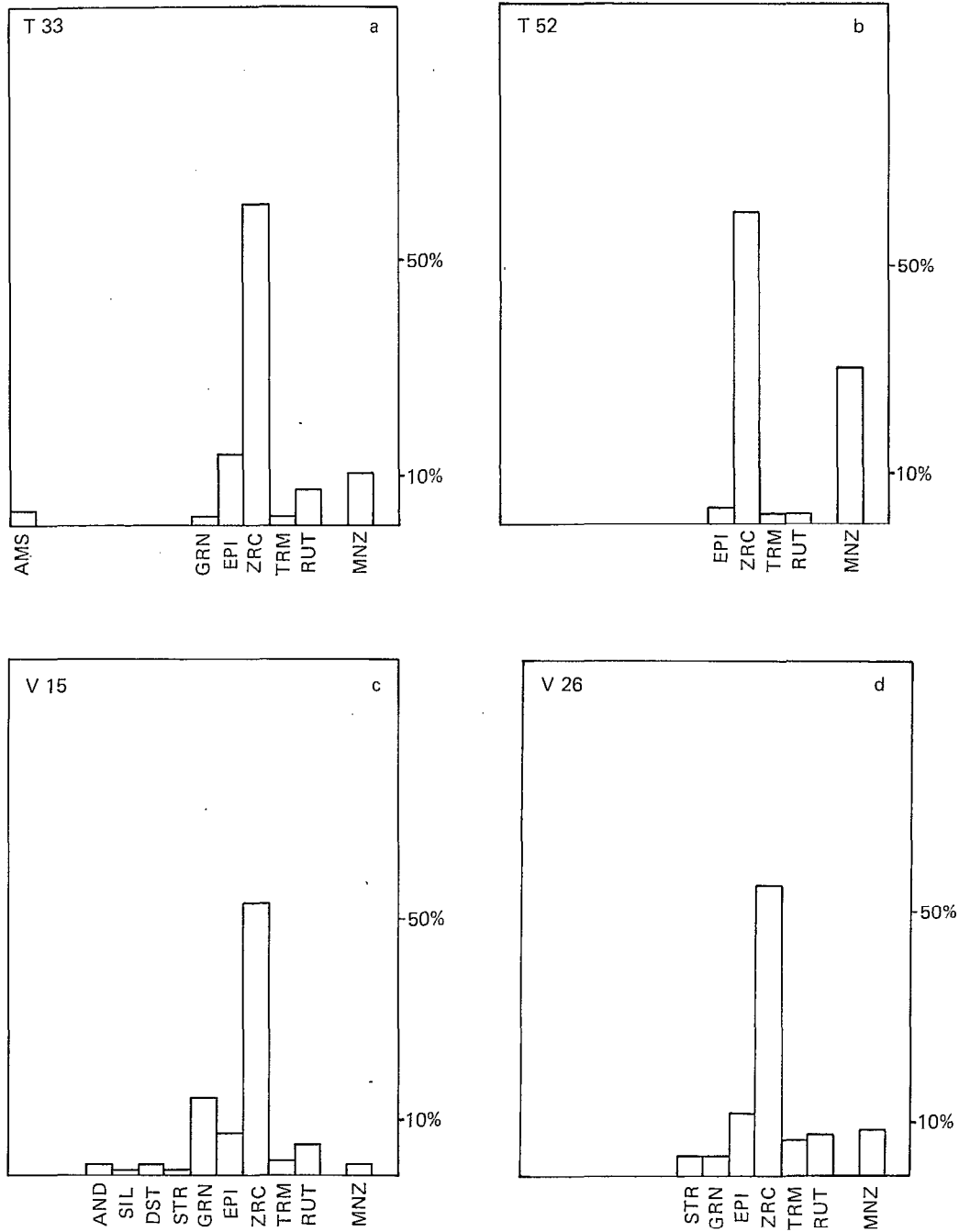


Fig. 13. — Cortèges minéralogiques des matériaux des karsts.

- a) Epandage pliocène à dominante ZRC EPI.
- b) Epandage pliocène à dominante ZRC MNZ.
- c) Matériau de décarbonatation - association à ZRC GRN et alias.
- d) Sol rouge sur calcaire - mélange de l'épandage et de la décarbonatation.

roo. Le groupe MNZ-SIL-AND pourrait donc être considéré comme une signature du Karroo.

En collationnant les points représentatifs des sols rouges de cet ensemble, selon qu'ils subissent ou non l'influence d'un substrat calcaire, on constate qu'il leur correspond deux nuages différents.

Les dunes anciennes rubéfiées de la région d'Antseva, qui se trouvent en position relativement continentale (jusqu'à 40 km de la côte) et loin de l'influence directe des grands fleuves, ne se distinguent pas des matériaux pliocènes de cette zone et contrastent par là fortement avec les matériaux dunaires de la côte Mahafaly et de Tuléar. Il s'agit donc du remaniement éolien d'épandages continentaux et non pas de la déflation de matériaux fluvio-marins.

Les formations dunaires : la plaine de Tuléar

82 individus représentent les formations littorales et sublittorales, éoliennes ou superficiellement éolisées, étendues de la côte mahafaly à la région d'Antseva ; les lits des fleuves ont été également repris à titre de repères. 14 variables ont été retenues. Les diagrammes obtenus présentent des configurations analogues à celles de l'échantillon global mais l'étalement ou la déconcentration de certains nuages, obtenu par la sélection des individus, favorise de plus fines discriminations.

Trois pôles déterminent deux gradients principaux ; les individus composent des nuages plus ou moins individualisés et excentrés selon qu'ils traduisent un équilibre entre deux pôles ou l'influence prédominante de l'un d'entre eux.

Autour du pôle PRX-HRN se regroupe l'ensemble des matériaux dunaires aepyorniens prélevés entre la Linta et l'Onilahy sur le littoral mahafaly. Le lit de l'Onilahy y est inclus marginalement. Cet ensemble est caractérisé par une nette prédominance des hornblendes et du grenat, en proportions à peu près égales, et par la présence de pyroxène.

Autour du pôle GRN ou excentrés par rapport à lui se regroupent tous les matériaux dunaires riverains du Fiherenana et le lit de ce fleuve. L'ensemble est caractérisé par la prédominance du grenat, accompagné de taux variables de zircon.

Autour du pôle ZRC-MNZ se retrouvent tous les représentants de la grande nappe de sables roux éolisés qui s'étend de la rive nord du Fiherenana à la région d'Antseva et au-delà, ainsi que le lit de la Manombo. L'ensemble est caractérisé par la prédominance du zircon accompagné de monazite.

En positions intermédiaires, entre les trois pôles, on distingue encore 4 ensembles largement inter-pénétrés qui représentent les formations dunaires de la plaine de Tuléar.

Ces résultats mettent de nouveau en valeur l'existence de 3 sources de sables dont les influences prédominent ou s'équilibrent dans l'espace et dans le temps :

- . sables à hornblende et grenat issus du socle et transportés par l'Onilahy ou la Linta,
- . sables à grenat issus du bassin sédimentaire et véhiculés par le Fiherenana,
- . sables à zircon et monazite liés aux nappes détritiques d'interfleuves.

En ce qui concerne la plaine de Tuléar, la complexité des phénomènes qui s'y manifestent justifiait la reprise d'un échantillon restreint, de 61 individus.

Rappelons que ce domaine est constitué en grande partie par quatre formations dunaires aepyorniennes qui se chevauchent et se fossilisent d'est en ouest ; les trois premières sont rubéfiées tandis que la plus récente ne l'est pas. Nous les avons décrites naguère sous les notations Q1, Q21, Q22, Q3, qui réservaient les équivalences (Sourdat et Gense, 1969) mais on peut sans doute les attribuer aux périodes de régression marine et de déflation éolienne qui ont suivi respectivement les transgressions tatsimienne, karimbolienne et flandrienne, avec un dédoublement de l'épisode post-karimbolien (fig. 14).

Le collationnement des individus fait apparaître des nuages distincts bien que largement inter-pénétrés :

— le nuage représentatif de Q1, caractérisé par un équilibre hornblende-grenat reflète l'influence des apports de l'Onilahy,

— le nuage de Q21 recouvre et déborde celui de Q1 ; l'équilibre se déplace au profit du grenat et traduit une certaine influence des apports du Fiherenana,

— le nuage de Q22, bien démarqué par rapport aux précédents et caractérisé par un équilibre grenat-zircon, sans monazite et avec peu de hornblende, reflète l'influence du Fiherenana,

— les points de Q3 par contre sont dispersés et reflètent l'influence de l'un ou l'autre fleuve selon que les gisements correspondants sont étagés en latitude, à proximité de l'un ou l'autre cours.

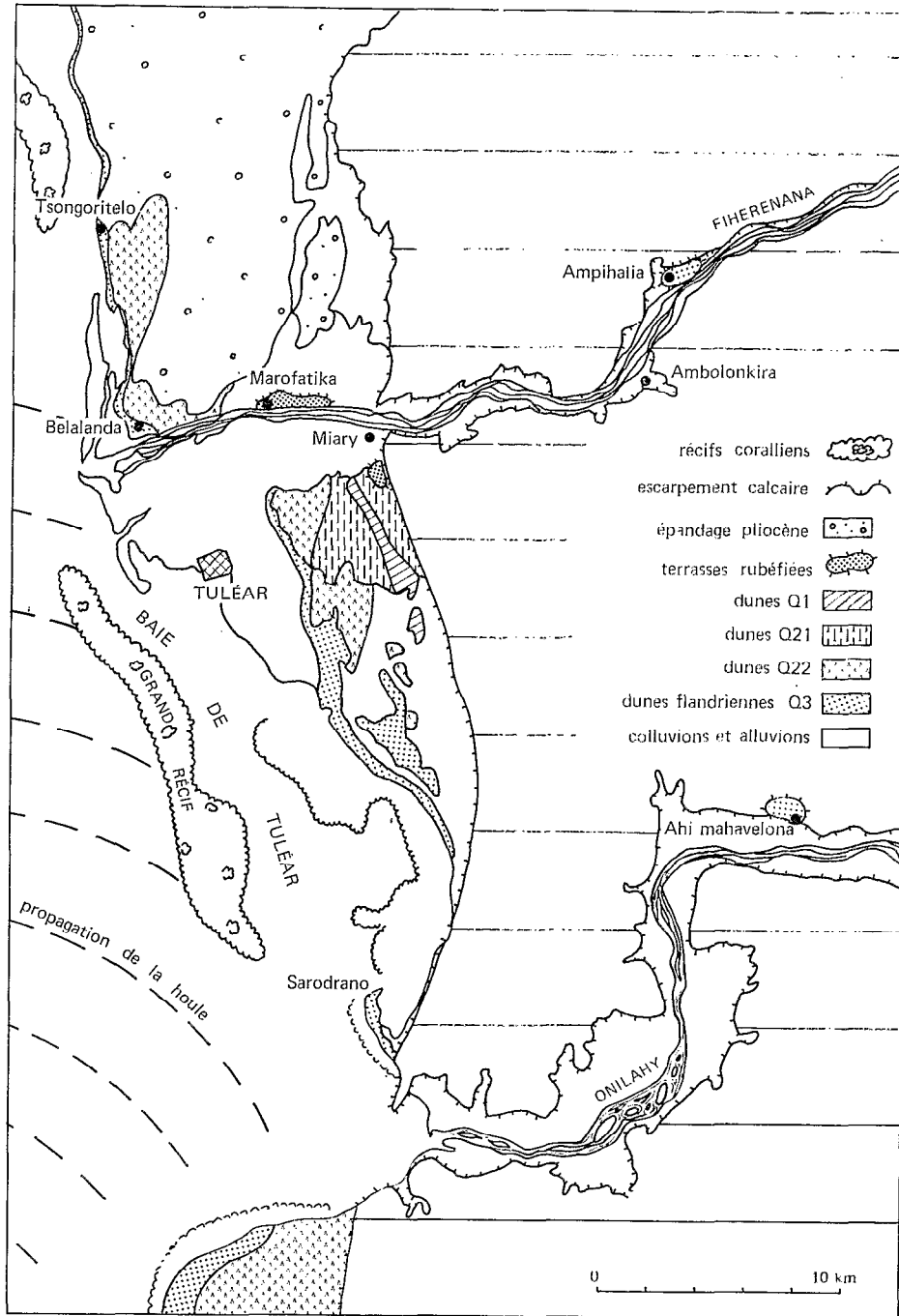


FIG. 14. — La région de Tuléar.

Pour autant qu'on puisse conclure d'un nombre assez restreint de prélèvements et compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, il semble donc que l'influence des apports de l'Onilahy, qui prédominait dans la baie de Tuléar au début de l'Aepyornien a été progressivement réduite au profit des apports du Fiherenana.

En ce qui concerne les formations situées au nord du Fiherenana et qui présentent un modelé éolien plus ou moins caractéristique, on constate une importante différence. L'avancée dunaire en double fer de lance qui s'étend de Belalanda à Tsongoritelo et le cordon dunaire flandrien qui la frange présentent des cortèges riches en grenat : on en conclut qu'ils procèdent de la déflation des zones proches du delta et sont donc bien d'origine fluvio-marine. La grande nappe de sables roux éolisés qui se trouve en position plus intérieure et s'étend au nord vers Antseva présente par contre un cortège à zircon et monazite qui l'apparente aux épandages pliocènes : leur origine serait donc essentiellement continentale. Cette distinction avait été pressentie par Bosser et Hervieu (1958) sur la base d'analyses granulométriques.

On constate par ailleurs que les affinités ou différences entre matériaux dunaires s'établissent au niveau des strates sédimentaires et non à celui des horizons pédologiques. On remarque que la pédogenèse qui s'est traduite par des phénomènes de décarbonatation et de rubéfaction assez intenses n'a pas modifié significativement le taux de minéraux réputés sensibles à la corrosion tels que les hornblendes et les pyroxènes.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE MORPHO-PÉDOGÉNÉTIQUE DU SUD-OUEST

Origines et spécificité des minéraux lourds du Sud-Ouest

Les seuls stocks minéralogiques vraiment originaux proviennent du socle précambrien et accessoirement des basaltes ; les stocks du bassin sédimentaire ne représentent que des remaniements de ceux-ci.

D'autre part, un cortège minéral, caractéristique d'une formation géologique donnée, soumise à des climats agressifs, n'est exporté que si le réseau hydrographique affouille les couches profondes de cette formation. Les couches superficielles par contre, ayant subi les effets cumulés des alternances bi-rhexistatiques anciennes et récentes, voient leurs

cortèges propres réduits aux espèces minérales les plus résistantes : c'est pourquoi l'on ne trouve plus sur les interfluves que des espèces communes et peu significatives. Chaque formation géologique est donc la source potentielle de deux cortèges, l'un spécifique, l'autre résiduel.

Enfin, pour que la spécificité relative d'un minéral ait une utilité pratique et qu'il puisse être considéré comme un « traceur », il faut qu'il constitue, non seulement une proportion numérique élevée du cortège, mais aussi une proportion pondérale non négligeable de la roche, sous peine d'échapper aux comptages ou de se trouver « dilué » au sein d'autres stocks, en cas de mélanges ou de contaminations.

Dans le domaine du socle, l'altération ferrallitique élimine les minéraux primaires des horizons superficiels des sols mais, comme l'avait indiqué Hervieu, il en reste assez dans les horizons sub-superficiels — les « zones de départ » — pour approvisionner le réseau hydrographique en cortèges caractéristiques. Notre étude confirme que les minéraux « traceurs » du socle sont les amphiboles.

Des sols sur basaltes, jeunes et non contaminés, contiennent des taux numériques exceptionnellement élevés d'augite, mais ce minéral n'est pas un bon traceur. Sa vulnérabilité le destine à une altération précoce tandis que son faible pourcentage pondéral l'expose à être dilué au contact d'autres cortèges.

Bien que le bassin sédimentaire soit constitué par définition de matériaux antérieurement altérés et remaniés, il renferme encore en profondeur quelques cortèges assez bien diversifiés dont on pourra retrouver la trace dans les fleuves.

Sur les interfluves de l'Isalo cependant, cette diversification n'a pas résisté aux alternances de remaniements et d'altérations plio-aepeyorniennes : les cortèges sont réduits aux espèces résiduelles au premier rang desquels figure toujours le zircon ; notre échantillon n'a montré que peu de grenat et jamais d'apatite, minéraux cités par Braxmeyer comme caractéristiques.

Dans le domaine karstique, on pourrait conclure de quelques décarbonatations expérimentales qu'il existe un cortège spécifique caractérisé par l'abondance du grenat (74 % dans un calcaire de Vineta) et par la présence de nombreux accessoires. Néanmoins, les cortèges résiduels de la décarbonatation réelle se trouvent tellement dilués au contact des cortèges des nappes détritiques de couverture que nous n'aurions pu les distinguer avec certitude sans le secours de l'analyse factorielle. Les cortèges des

calcaires se sont trouvés masqués également dans le cas des sols calcimorphes érodés riverains des fleuves.

Si la pauvreté des cortèges des matériaux détritiques d'interfluves est décevante à l'échelle locale, elle est par contre significative à l'échelle régionale, par rapport au socle, aux lits des fleuves et à la côte. Nous avons de plus signalé que des concentrations locales de tourmaline, d'épidote, de monazite ou de rutile pourraient être considérées comme la trace de telle ou telle strate de l'Isalo qui reste à déterminer ; des filiations ont été suggérées, entre matériaux des dômes sableux de l'Isalo, des buttes sableuses sur karsts et sols rouges avoisinants. Un échantillonnage systématique permettrait de préciser ces filiations et de reconstituer des cheminements.

Les cortèges fluviaux et leur évolution

Il est intéressant de considérer les cortèges des trois fleuves qui ont fait l'objet de prélèvements.

Le cortège de l'Onilahy, qui draine à la fois le socle, le sédimentaire et les basaltes, est caractérisé en aval par des hornblendes et du grenat. Le cortège du Fiherenana qui ne draine pas le socle est réduit à la dominance du grenat. La Manombo enfin, qui ne draine ni le socle ni l'Isalo ne véhicule plus que du zircon. Cela met en évidence les corrélations hornblende-socle et grenat-Isalo.

Il se confirme que les cortèges spécifiques des calcaires (grenat) et des basaltes (pyroxènes) sont pondéralement négligeables en présence d'autres apports : cela est manifeste dans le cas de la Manombo qui draine ces formations et dont le cortège ne reflète néanmoins que l'influence des nappes détritiques d'interfluves (zircon) qui atteignent sa vallée par colluvionnement (fig. 15).

En ce qui concerne les terrasses anciennes rubéfiées qui bordent l'Onilahy et le Fiherenana dans leurs cours moyens et inférieurs et dominent les lits actuels d'une vingtaine de mètres parfois, il est inté-

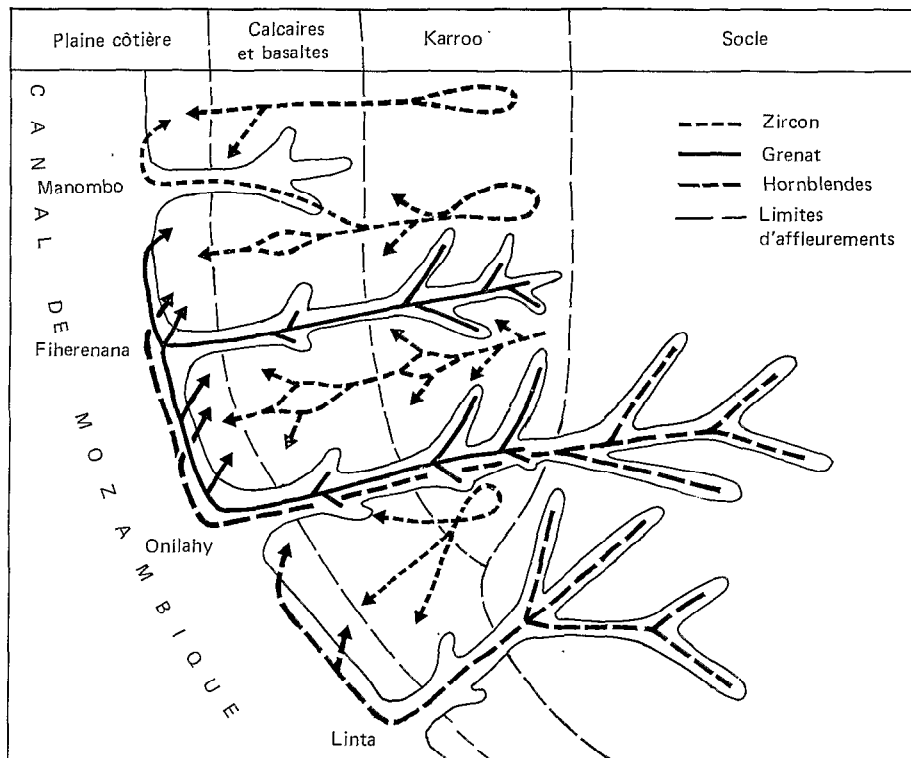


FIG. 15 — Schéma de cheminement de minéraux lourds dans les fleuves et sur les interfluves.

ressant de noter que leurs cortèges reflètent des filiations différentes. Les terrasses du Fiherenana (1) s'apparentent par la minéralogie au lit de ce fleuve (ensemble G3); l'une de celle de l'Onilahy (2) s'apparente aux buttes et aux épandages détritiques pliocènes qui encadrent le canyon (ensemble Z2). Il y a donc lieu de croire que certaines terrasses anciennes résultent d'un large colluvionnement latéral et non pas seulement d'un alluvionnement linéaire qui, dans le cas de l'Onilahy, aurait introduit un cortège à hornblendes. Ce mécanisme s'accorde d'ailleurs mieux avec leur granulométrie grossière.

Un échantillon tel que le nôtre ne peut résoudre tous les problèmes ni exclure d'apparentes contradictions : c'est ainsi qu'un épandage sableux rubéfié riverain du Fiherenana, prélevé à Mahaboboka, en aval de l'Isalo et du Jurassique marno-calcaire, mais en amont du canyon calcaro-basaltique, s'est montré plus riche en grenat (G4) que les matériaux de l'Isalo (Z) et moins riche que les terrasses rubéfiées et les dunes, riveraines du canyon et du delta (G3). Il y aurait donc eu enrichissement en grenat, d'amont en aval, et particulièrement dans la traversée de formations qui semblaient n'en pas avoir fourni à la Manombo.

On peut se demander à ce propos s'il n'y a pas lieu de retenir une hypothèse de Braxmeyer selon laquelle les grenats, qui sont à l'origine beaucoup plus volumineux que les zircons, pourraient être fractionnés en cours de transport, de sorte que le nombre de fragments augmente ; le comptage portant sur des grains, il y aurait augmentation apparente du rapport grenat/zircon d'amont en aval, cet enrichissement relatif étant accru par l'élimination des grains les plus petits.

Cet artefact repose le problème de la méthodologie des comptages.

Dérive et sédimentation littorales

Bien que notre échantillon ne couvre que des portions limitées de la côte du Sud-Ouest et ne comporte pas de prélèvements des grands fleuves du Sud, on peut avancer que les cortèges des plages et des dunes reflètent l'influence prédominante du fleuve dont l'embouchure se trouve immédiatement au sud du prélèvement considéré. Les résultantes des poussées hydro et aérodynamiques s'exerceraient donc bien

dans le sens général Sud-Nord comme le laissent supposer les images des houles et le modelé dunaire (Weydert, 1973 et Battistini, 1964).

Les dépôts situés au fond de la baie de Tuléar représentent un cas particulier en raison de leur situation abritée. Les influences des apports de l'Onilahy et du Fiherenana y sont antagonistes et leur équilibre semble s'être déplacé au cours de l'Aepyornien, au profit des uns ou des autres alternativement.

On serait tenté d'admettre que le Grand Récif de Tuléar se soit édifié dès le commencement de la période aepyornienne, fermant la baie progressivement à l'influence de l'Onilahy sans amoindrir celle du Fiherenana qui y garde un accès direct. Cette « chronologie longue » de la construction du récif n'est cependant proposée par Weydert qu'à titre d'alternative et d'autres auteurs la contestent, considérant le récif comme post-flandrien (Maugé, à paraître). Du reste, la formation au cours des grandes régressions aepyorniennes de trois dalles gréseuses ou organogènes qui se succèdent en avant du rivage et sur lesquelles les récifs se seraient ultérieurement implantés suffirait à expliquer l'amoindrissement de l'influence des apports de l'Onilahy.

Signification morpho-pédogénétique de quelques observations

— L'Isalo tabulaire est couvert de matériaux meubles dont le caractère ferrallitique est très accusé ; il était donc logique que leurs cortèges, réduits presque exclusivement au zircon, fussent les plus appauvris de l'échantillon. On aurait pu par contre s'attendre à trouver quelques cortèges bien diversifiés — avec le grenat et l'apatite signalés par Braxmeyer dans les matériaux cohérents de l'Isalo ruiniforme dont le modelé suggère un très fort rajeunissement. Ils se sont néanmoins révélés relativement pauvres. Il n'avait d'ailleurs pas été possible d'extraire de ces mêmes matériaux une autre argile que la kaolinite bien que de la montmorillonite fût signalée par les auteurs comme ciment des grès.

Ceci incline à penser que les reliefs ruiniformes qui sont aujourd'hui à l'affleurement et sur lesquels ont été effectués nos prélèvements sont représentatifs non pas d'une roche saine, mais d'une roche reconsolidée, postérieurement à l'érosion d'une surface sous laquelle l'altération avait été puissante et prolongée.

— Autochtonistes et allochtonistes se sont souvent affrontés à propos des sols rouges des karsts. Dans le cas particulier du SW de Madagascar, les

(1) Ampihalia, Miary et Marofatika.

(2) Ambohimahavélona.

résultats minéralogiques obtenus tendraient à les mettre d'accord : les horizons profonds des sols présentent en effet les mêmes cortèges que les calcaires sous-jacents tandis que les horizons superficiels s'apparentent à ceux des sables pliocènes qui les avaient autrefois fossilisés.

C'est la présence d'une couverture sableuse allochtone et l'influence du pédoclimat relativement humide qu'elle entretient qui permettent à la décarbonatation de persister, en dépit de l'aridification récente du climat (Sourdat, 1969 ; Sourdat, Battistini et Karche, 1971). Cette décarbonatation enrichit la base des profils en résidus autochtones.

— Quelques observations — il s'agit des cas particuliers signalés au cours de l'analyse — concernent la base de sols bruns-calcaires situés sur les escarpements fortement érodés du plateau : à Miary au débouché du Fiherenana et à Ambolonkira dans son canyon ; à Sarodrano, au nord du débouché de l'Onilahy. Ce sont des sols jeunes ou rajeunis ; on pouvait présumer que leurs cortèges reflèteraient ceux des calcaires. Or ceux des deux premiers prélèvements se classent (G3) avec le lit du Fiherenana, tandis que celui du dernier se classe avec le lit de l'Onilahy (G2).

Il y a donc lieu d'interpréter avec prudence les cortèges supposés résiduels sur calcaires ; tout se passe comme si ces cortèges étaient localement inexistantes ou totalement masqués par une contamination. Contrairement à ce qui se passe sur le plateau où la contamination vient des nappes d'interfluves, les cortèges dénotent ici l'influence des fleuves.

— La présence de pyroxènes et d'amphiboles dans les terrasses fluviales et les dunes aepyorniennes revêt également une signification particulière puisqu'il est classiquement admis que ces minéraux sont parmi les plus vulnérables et ne sauraient résister à une pédogenèse longue ou intense. Or, les plus anciennes de ces formations notées Q1 seraient tatsimiennes, soit âgées de plusieurs centaines de milliers d'années.

Aucun critère déterminant n'ayant permis jusqu'à présent d'évaluer le degré d'intensité de la pédogenèse qui s'est exprimée par la décarbonatation et la rubéfaction, on retiendra que la conservation des minéraux les plus labiles témoigne d'une intensité assez faible, à moins d'invoquer le facteur temps, et de supposer qu'une altération, fût-elle au degré d'intensité ferrallitique, appliquée postérieurement au Tatsimien, n'aurait pas suffi à éliminer ces minéraux.

Représentativité des comptages

La capacité croissante des nouvelles méthodes d'analyses multivariées à extraire les informations contenues dans des données numériques conduit à rechercher une meilleure conformité de celles-ci à la réalité. En effet, le passage du qualitatif au quantitatif implique, dans les études de minéraux lourds, une meilleure représentativité des comptages qui, en dénombrant seulement les grains, ne donnent qu'une image déformée des quantités volumétriques ou pondérales ; c'est ce que laisse supposer dans le cas présent l'enrichissement apparent, en grenat, du lit du Fiherenana, d'amont en aval.

Cette critique avait déjà été formulée par Berthois (1947) et il semble que l'emploi de techniques élaborées d'analyse mathématique implique une plus grande précision dans la préparation des données. Ainsi, une évaluation volumétrique approchée pourrait être simplement obtenue en affectant les comptages des minéraux de chaque fraction granulométrique d'un coefficient lié à la maille des tamis, ou, plus directement par l'emploi d'un dispositif de comptage par points, voire de comptage en continu.

CONCLUSIONS

L'interprétation des comptages de minéraux lourds effectués sur les formations superficielles du sud-ouest de Madagascar s'annonçait délicate. D'une part, en effet, les milieux sédimentaires des régions tropicales sont peu propices à ce genre d'investigation ; d'autre part, les éléments propres à orienter l'interprétation, loin d'être connus préalablement, constituaient l'objet même des recherches ; enfin, l'échantillon, prélevé originellement à des fins pédologiques comportait des lacunes.

L'analyse factorielle des correspondances, tirant le meilleur parti des données réunies, a néanmoins permis de mieux définir les matériaux en question et leurs affinités.

Par l'intermédiaire de l'étude comparative des cortèges minéralogiques, les origines des divers matériaux superficiels, leurs cheminements, certaines modalités de leur évolution pédologique et de leurs remaniements ont été reconnus. Des discriminations ont été établies entre matériaux allochtones et autochtones, entre les cortèges spécifiques et résiduels. Une filiation directe est apparue entre les cortèges spécifiques du socle précambrien et des dépôts littoraux par l'intermédiaire des fleuves et de la dérive litto-

rale : ces matériaux transitent de la périphérie du bassin sédimentaire à la côte sans laisser de traces dans les interfluves. Une autre filiation se manifeste parallèlement entre les cortèges résiduels des matériaux d'interfluves, des grès de l'Isalo et de leurs élévations aux divers épandages pliocènes et aux contaminations qui en dérivent : on constate une sorte d'autonomie minéralogique du bassin sédimentaire, qui affecte les interfluves et n'est rompue que par une petite quantité de résidus d'altération des basaltes interstratifiés et des calcaires, ou par le rejet à la côte des matériaux fluvio-marins issus du socle (fig. 15).

Des solutions satisfaisantes ayant été apportées à de nombreux problèmes régionaux, c'est avec les meilleures chances de succès que l'on pourrait reposer certains problèmes particuliers, sur des bases élargies grâce à de nouveaux prélèvements.

Dans le cadre des études pédologiques, les possibilités d'exploitation offertes par l'AFC justifient le prélèvement d'échantillons importants, propres à couvrir de vastes ensembles régionaux et débordant les limites de l'observation locale. C'est en effet par référence à un inventaire aussi complet que possible des cortèges minéralogiques caractéristiques d'une

région que les comparaisons deviennent aisées et fructueuses.

L'AFC s'avère une méthode parfaitement adaptée à l'exploitation des comptages minéralogiques dont elle accroît sensiblement l'efficacité. Sa vulgarisation permettra sans doute d'étendre ce mode d'investigation à des domaines où il était jusqu'à présent négligé mais sa sensibilité incitera également les utilisateurs à une rigueur plus grande et à une réflexion plus approfondie quant à la détermination des données.

REMERCIEMENTS

La séparation et le comptage des minéraux lourds ont été effectués au laboratoire de Géologie des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM sous la direction de Mme M. Delaune à qui nous exprimons notre gratitude.

— Les données informatiques ont été préparées par le Bureau de Calcul de l'ORSTOM (SSC) et traitées par l'Atelier d'Informatique des Universités de Paris que nous remercions de leur collaboration.

Manuscrit reçu au SCD de l'ORSTOM le 15 décembre 1974

BIBLIOGRAPHIE

- BATTISTINI (R.), 1964. — L'Extrême-Sud de Madagascar. Etude géomorphologique. Thèse de Doc. lettres. Etudes malgaches n° 10 et 11, 636 p.
- BEHIER (J.), 1954. — Etude des minéralisations des plages de Madagascar. Tananarive, Serv. Géol. T.B.G. n° 55, *multigr.*, 76 p.
- BENZECRI (J.P.), 1973. — L'analyse des données. I et II. Dunod, Paris, 615 et 619 p.
- BERTHOIS (L.), 1947. — Nouvelle méthode d'étude quantitative des assemblages de minéraux lourds. *Bull. Inst. Océano. Monaco*, n° 912.
- BOSSER (J.), HERVIEU (J.), 1958. — Notice sur la carte d'utilisation des sols de la plaine de Tuléar. I.R.S.M. Tananarive, *multigr.*, 44 p.
- BRAXMEYER (G.), 1959. — Application de la méthode des minéraux lourds aux formations Karoo du bassin de Morondava. Société des Pétroles de Madagascar, *multigr.*, n° 405, 33 p.
- DIXEY (F.), 1958. — Observations sur les surfaces d'érosion à Madagascar. *C.R. Acad. Sci.*, t. 247 : 944-947.
- DUPLAIX (S.), 1958. — Détermination microscopique des minéraux des sables. Paris et Liège, Lib. Polytechnique Ch. Béranger, 96 p., 69 fig.
- HEIN (P.), 1974. — Méthodes statistiques nouvelles et sédimentologie ; application à l'étude de la répartition des minéraux lourds dans le Barthonien du Bassin parisien. Thèse 3^e cycle Paris VI.
- HERVIEU (J.), 1959. — Les sables roux du sud de Madagascar. *Conf. Interafric. Sols*, 3, 1959, Dalaba, vol. 1 : 233-243.
- HERVIEU (J.), 1965. — Au sujet de certaines caractéristiques texturales et minéralogiques des alluvions du Mangoky (S-W de Madagascar). *C.R. Sem. Géol. Madagascar* : 13-19.
- HERVIEU (J.), 1965*. — Note sur les formations néogènes dans les régions côtières de l'ouest et du nord-ouest de Madagascar. *C.R. Sem. Géol. Madagascar* : 19-27.
- HERVIEU (J.), 1968. — Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. Thèse doct. ORSTOM, Paris, Mémoire n° 24, 465 p.
- MAHÉ (J.) et SOURDAT (M.), 1972. — Sur l'extinction des Vertébrés sub-fossiles et l'aridification du climat dans le Sud-Ouest de Madagascar. Description des gisements. Datations absolues. *Bull. Soc. Géol. de F.* (7), t. XIV, : 295-309, 8 fig.
- MAUGE (L.A.), à paraître. — Réflexions sur les structures littorales et récifales du sud-ouest de Madagascar.
- RERAT (J.C.), 1965. — Contribution de l'étude des minéraux lourds à la stratigraphie du bassin de Majunga. *C.R. de Sem. Géol. Madagascar* : 43-45.
- SOURDAT (M.), 1969. — Notes de climatologie descriptive. Région sud-ouest de Madagascar (Préfecture de Tuléar). Centre ORSTOM de Tananarive. *Multigr.*, 29.

- SOURDAT (M.), 1970. — Sur deux témoins des épandages continentaux pliocènes et de la topographie fini-tertiaire sur les plateaux karstiques de la région de Tuléar. In : *C.R. Sem. Géol. de Madagascar*, Impr. Nat. Tananarive: 25-29 + planche n° 4.
- SOURDAT (M.), 1970*. — Carte pédologique de Tuléar-Ambohimahavelona à 1/100 000 sur fonds I.G.N. n° C58-D58, en couleurs. Notice, 66 p. *multigr.*, datée 1973. Centre ORSTOM de Tananarive.
- SOURDAT (M.), 1972. — Carte pédologique de Antseva à 1/100 000 sur fond I.G.N. n° C56. Notice. Centre ORSTOM et Ministère du Développement Rural, Tananarive. (48 p., 5 fig., 63 tabl.,) + carte dépl. en coul.
- SOURDAT (M.), 1973. — Carte pédologique de Vineta à 1/100 000 sur fonds I.G.N. n° E57-E58. Notice. Centre ORSTOM et Ministère du Développement Rural, Tananarive, 60 p. *multigr.*, fig. dont 10 h-t, tabl. dont 33 h-t + carte dépl. en coul.
- SOURDAT (M.), BATTISTINI (R.) et KARCHE (J.P.), 1971. — Phénomènes de pédogenèse et de karstification dans le sud-ouest de Madagascar. In : *Madagascar. Revue de Géographie* n° 18, janvier-juin 1971: 49-75.
- SOURDAT (M.) et GENSE (C.), 1969. — Les sables roux de la région de Tuléar. Observations stratigraphiques. Analyses par diffraction aux rayons X. In : *C.R. Semaine Géologique de Madagascar*, Impr. Nat. Tananarive: 99-104, planche h-t n° 17.
- SOURDAT (M.) et MAHÉ (J.), 1974. — Etude de cortèges de minéraux lourds par l'analyse factorielle des correspondances; application aux formations superficielles du sud-ouest de Madagascar. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 279 (16 décembre 1974), série D : 1845-1848.
- TRICART (J.), 1965. — Principes et méthodes de la géomorphologie. Masson édit. Paris, 496 p.
- WEYDERT (P.), 1973. — Morphologie et sédimentologie des formations récifales de la région de Tuléar. S-W de Madagascar. Thèse doc. Sc. Nat. Univ. Aix-Marseille. *Multigr.*, 646 p. et annexe, 80 p.