

**ÉTUDES GRANULOMÉTRIQUES PAR LES MÉTHODES CLASSIQUES
ET PAR L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES
APPLICATION AUX FORMATIONS SUPERFICIELLES DU SUD OUEST
DE MADAGASCAR**

Michel SOURDAT*, Joël MAHÉ** et Mireille DELAUNE-MAYÈRE***

* *Section de Pédologie, Services Scientifiques Centraux ORSTOM
70-74, route d'Aulnay, 93 Bondy*

** *Laboratoire de Géologie, Faculté des Sciences,
33, rue Louis-Pasteur, 84000 Avignon.*

*** *Laboratoire de Géologie, ORSTOM, Bondy.*

RÉSUMÉ

L'exploitation empirique des données granulométriques consiste à représenter chaque observation par un histogramme, une courbe cumulative ou divers paramètres qui en dérivent, puis à comparer les figures ou paramètres obtenus entre eux. Ces méthodes sont parlantes, mais fastidieuses et non exemptes d'arbitraire.

L'AFC prend en compte globalement l'information contenue dans les données et en extrait une expression graphique synthétique : observations et classes dimensionnelles sont représentées en fonction de leurs affinités mutuelles, et leurs positions réciproques sont significatives.

Des discriminations et regroupements remarquables apparaissent entre types de gisements. Ainsi, dans le domaine de l'ISALO, où l'on discrimine les sols ferrallitiques sur grès, la « carapace sableuse » et tous les autres matériaux de la zone ; dans le domaine karstique, l'on discrimine les sols rouges liés aux calcaires et ceux qui leur sont simplement associés ; dans le domaine littoral, se manifestent les origines diverses des formations dunaires.

Des résultats paradoxaux sont commentés. Il semble que le cumul des résidus d'altération de nombreuses strates sédimentaires, originellement homogènes, puisse dans certaines conditions donner naissance à un sol hétérométrique. Une séquence granulométrique originale, propre au milieu sédimentaire tropical est ainsi révélée.

L'AFC offre donc aux études granulométriques une approche nouvelle qui peut être complétée par les techniques classiques, utilisées plus rationnellement. Cette méthode est appliquée avec succès à un échantillon régional particulièrement délicat.

ABSTRACT

Empirical use of grain-size data provides a record of observations in block graphs, cumulative frequency curves or parameters derived from them, and in comparison of the figures and parameters obtained.

AFC takes into account all the information contained in the data and obtains from it a synthesis of the information expressed graphically. Groupings and other observations according to size and shape are represented according to their similarity ; their reciprocal positions are therefore significant.

Some remarkable discriminations and groupings may be made between different types of source-material. In the ISALO domain, separation is to be made between ferallitic soils overlying sandstones, the « sand covering », and all other materials found in the area. In the karstlands, the red soils overlying limestones may be distinguished from those which simply happen to be associated. In the coastlands the different origins of dune formations may be traced.

Some of the more paradoxal conclusions are commented on. It seems that the accumulated residue

of weathering debris coming from several sedimentary layers gives rise to a relatively homogeneous (in size) deposit, but this under certain conditions may give rise to a soil formed of heterogeneous elements. A sequence in grain-size evolution is thus revealed, being a geomorphological process only found in a tropical sedimentary environment.

AFC provides a new approach to grain-size analysis, which may be complemented by established techniques, used rationally. The method is used here successfully with reference to a particularly delicate case of regional sampling.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ФАКТОРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА СООТВЕТСТВИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ К ПОВЕРХНОСТНЫМ ОБРАЗОВАНИЯМ ЮГО-ЗАПАДНОГО МАДАГАСКАРА

РЕЗЮМЕ

Эмпирическое использование гранулометрических данных заключается в изображении каждого наблюдения посредством гистограммы, кумулятивной кривой или различных зависящих от нее параметров, а затем в сравнении полученных фигур или параметров. Эти методы — выразительны, но кропотливы и не лишены произвольного начала.

ФАС полностью учитывает содержащуюся в данных информацию и извлекает из нее синтетическое графическое выражение: наблюдения и размерные классы представлены в зависимости от их взаимного сродства и соответственные их положения являются значащими.

Заметные дискриминационные перегруппировки проявляются между типами залегающих. Например в области ИЗАЛО, где различаются ферралитные почвы на песчанниках, «песчаный панцырь» и другие материалы этой зоны; в карстовой области различаются связанные с известняками красные почвы и просто приобшеченные к последним; в береговой области наблюдаются различные происхождения дюнных образований.

Парадоксальные результаты комментируются. Повидимому накопление остатков выветривания многих осадочных слоев, первоначально гомометрических, может произвестись в известных условиях гетерометри-

ческую почву. Таким образом обнаруживается существование своеобразной гранулометрической последовательности, свойственной тропической осадочной среде.

Следовательно ФАС предоставляет гранулометрическим исследованиям новый подход, который можно дополнить классическими методами с более рациональным использованием последних. Этот метод успешно применяется к местной, особенно затруднительной, пробе.

INTRODUCTION

Dans le cadre d'une prospection pédologique du sud-ouest de Madagascar, nous avons abordé l'étude minéralogique et granulométrique des formations superficielles. L'exploitation des données a été effectuée par les méthodes classiques, et par recours à l'analyse factorielle des correspondances.

Le présent article développe une note récente, consacrée aux principaux résultats granulométriques (Sourdat et Mahé, 1975).

Le cadre géographique et géologique de l'étude, les principes de l'analyse factorielle des correspondances et certaines modalités pratiques de son application, ont fait l'objet de cartes, schémas et développements, dans les publications antérieures consacrées aux résultats minéralogiques (Sourdat et Mahé, 1974, 1975).

LES DONNÉES GRANULOMÉTRIQUES ET LEURS DIVERSES EXPRESSIONS EMPIRIQUES

L'échantillon et les données initiales

Nos prélèvements ont porté sur toutes sortes de matériaux meubles superficiels et sur quelques résidus expérimentaux de décomposition de roches cohérentes du sud-ouest de Madagascar. L'échantillon total comporte 304 individus.

Les sables ont été nettoyés puis séparés sur une colonne de tamisage selon une méthode classique (Cailleux et Tricart, 1959)*.

Les dimensions des mailles des tamis, définies par la norme AFNOR XII-501 sont telles que leurs rapports, pour deux tamis successifs soient constants, ($R = 1,259$), de sorte que leurs logarithmes constituent une progression arithmétique.

* Prélèvements et analyses ont été poursuivis, de 1966 à 1973.

N° du tamis	Dimension de la maille
34	2 000 microns
33	1 600 —
32	1 250 —
31	1 000 —
30	800 —
29	630 —
28	500 —
27	400 —
26	315 —
25	250 —
24	200 —
23	160 —
22	125 —
21	100 —
20	80 —
19	63 —
18	50 —
FDT	Fond de la colonne

Les résultats de pesées sur tamis étant ramenés à 100, les données granulométriques sont exprimées par une série de 18 pourcentages.

Cette série de 18 valeurs expérimentales constitue l'observation propre à 1 individu.

Expression empirique des données

Représentation graphique d'une observation

Chaque observation peut faire l'objet d'une ou plusieurs expressions graphiques qui visualisent la distribution dimensionnelle des grains du prélèvement considéré. L'histogramme et la courbe cumulative, établis en coordonnées semi-logarithmiques, sont les plus classiques.

Selon la nature du prélèvement, l'histogramme fait ressortir l'absence de triage et l'égalité des classes dimensionnelles, ou le triage au profit d'une classe dominante (le mode), ou encore le mélange de stocks caractérisés par un ou plusieurs modes. La dimension du mode et les dissymétries éventuelles de la distribution par rapport à ce dernier reflètent les mécanismes de la sédimentation.

La courbe cumulative est généralement plus éloquente. Elle se prête à une qualification synthétique de la distribution, grâce à la notion de *faciès granulométrique* (Rivière, 1952). Sans recourir nécessairement aux transformations géométriques qui relient les courbes expérimentales aux *courbes canoniques*, il est généralement possible de reconnaître empiriquement

le faciès d'une courbe expérimentale, en fonction de sa pente et de ses inflexions, et d'en tirer des conclusions génétiques :

— Le *faciès linéaire* (courbe rectiligne sans inflexions en coordonnées semi-logarithmiques), correspond à des sédiments qui sont en voie de formation par désagrégation des roches, et n'ont subi aucun transport.

— Le *faciès parabolique* (inflexions dissymétriques avec concavité tournée vers le haut) (1) indique que les caractères sédimentologiques sont toujours primitifs, mais qu'il y a eu transport de particules avec triage sélectif.

— Le *faciès logarithmique* (courbe redressée avec inflexions brusques), suggère des actions hydrodynamiques ou aérodynamiques puissantes.

— Le *faciès hyperbolique* (inflexions dissymétriques avec concavité tournée vers le bas), dénote une décantation des particules : en milieu calme si ces particules sont fines, ou en milieu agité si elles sont grossières.

— En plus des faciès classiques ainsi définis, il est commode de considérer un *faciès en S* correspondant aux courbes intergrades, moyennement redressées avec inflexions régulières et symétriques.

Après avoir caractérisé graphiquement et interprété chacune des observations qui composent l'échantillon, on peut les comparer et les classer les unes par rapport aux autres, par l'intermédiaire des diagrammes représentatifs.

Représentation graphique de l'échantillon

Lorsqu'un échantillon est constitué de nombreuses observations, il est utile de visualiser leur comparaison et d'en obtenir un classement au moyen d'une représentation graphique unique. Dans ce but, les caractéristiques granulométriques de chaque observation sont réduites à quelques paramètres, et matérialisées par un point sur un diagramme d'ensemble. Ce dernier évoque la diversité des distributions granulométriques à l'échelle de terrain d'étude.

La plupart des paramètres et indices de classement usuels dérivent graphiquement de la courbe cumulative. Nous en citerons deux.

— La *médiane* est l'abscisse du point correspondant à l'ordonnée 50 %, exprimée en millimètres.

— L'*indice de Krumbein* ou $Qd(\phi)$ représente l'écart des dimensions entre le premier et le troisième quartile. Il est mesuré en *échelle ϕ* .

(1) L'orientation des concavités s'entend pour un cumul qui va des petites aux fortes dimensions.

Ainsi, le *diagramme M/Qd(φ)* comporte, en abscisses, les valeurs de l'indice de Krumbein, et en ordonnées, les valeurs de la médiane. Il permet d'obtenir des nuages de points assez bien individualisés, auxquels correspondent les divers faciès de courbes (Sourdat et Delaune, 1970). Le classement obtenu rappelle celui auquel aboutit un regroupement direct des courbes cumulatives, par analogie de forme ; il est pratiquement plus objectif et plus maniable, mais ne dispense pas de la construction préalable des courbes ni de la mesure graphique des indices.

Le *diagramme C/M de Passega* (1963) est d'esprit différent. Il comporte en abscisses les médianes (M) de chaque observation, et en ordonnées les *unpercentiles* (C). L'ensemble des points représentatifs de toutes les distributions théoriquement possibles constitue le *pattern C/M* dans lequel trois zones graphiques sont significatives : elles correspondent à trois modalités diverses du transport par courant tractif.

— La suspension, qui n'est limitée que par le diamètre des particules et déplace les plus fines.

— Le roulement, qui est limité surtout par l'énergie du courant et déplace les particules les plus grossières.

— La suspension dégradée, qui correspond aux turbulences engendrées par le frottement du courant

sur le fond ; elle déplace diverses particules de tailles intermédiaires.

La situation graphique d'une observation ou d'un ensemble évoque donc le processus de transport responsable de sa mise en place.

Résultats obtenus

Histogrammes et courbes cumulatives

Au terme d'une première phase d'exploitation empirique des données, nous disposons d'un dossier d'histogrammes et de courbes cumulatives, à partir duquel un classement sommaire peut être effectué, par simples comparaisons.

L'examen d'un diagramme *M/QD(φ)* conduit à des regroupements analogues, présentés sur une image unique. Le collationnement des points représentatifs de matériaux homologues — matériaux apparentés dans la nature du fait de leur origine géologique, de leurs remaniements ou de leurs pédogénèses — permet de distinguer neuf nuages de points, plus ou moins chevauchants, correspondant à neuf familles granulométriques. Chacune d'elle peut être représentée par un faciès type (Cf. fig. 1 et pp. 132-136).

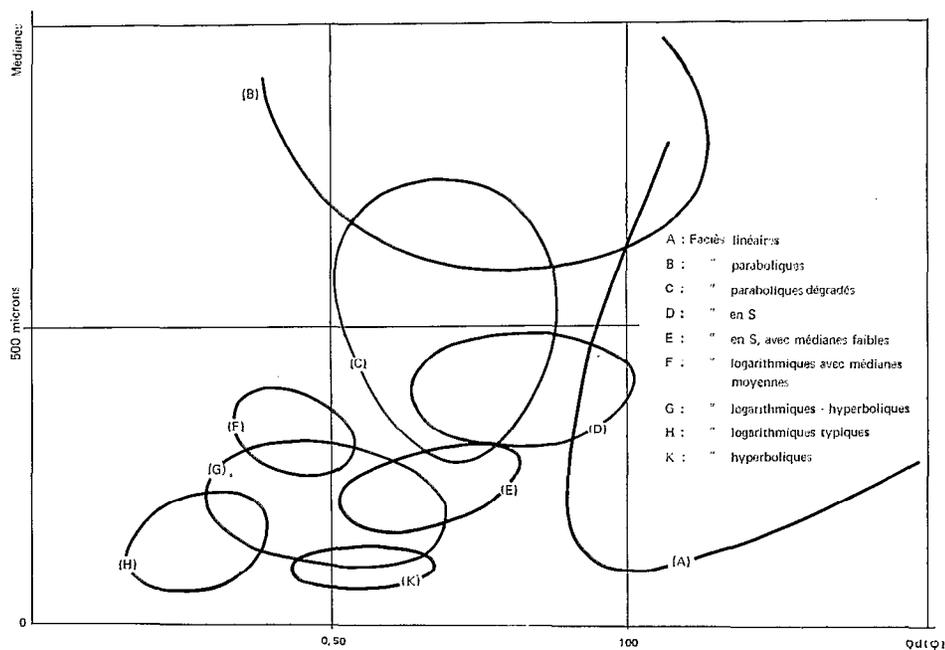


FIG. 1. — Diagramme *M/Qd(φ)*

Pattern C/M

Le report des observations sur le *pattern C/M* fait apparaître deux nuages de points très denses et coalescents dont la composition et la position sont significatives. On y observe en effet le regroupement d'observations apparentées par leurs gisements (fig. 2).

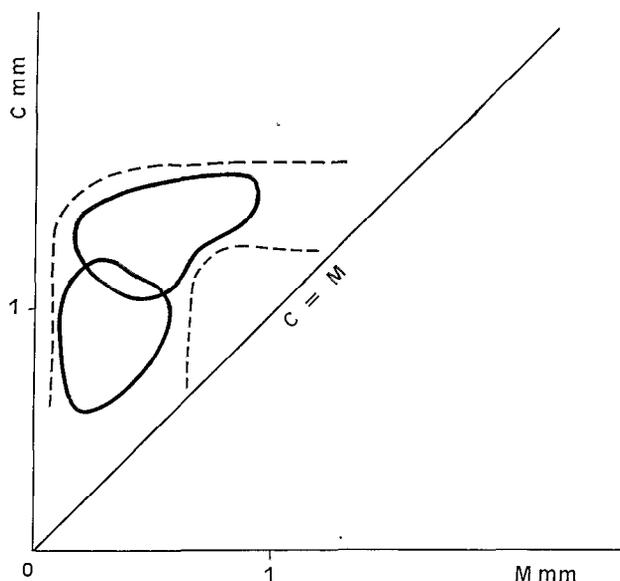


FIG. 2. — Pattern C/M de Passega.

Les points représentatifs des matériaux liés aux remaniements marins ou éoliens se situent dans la branche descendante du *pattern*, correspondant aux suspensions dégradées remaniées par des agents puissants.

Les points représentatifs des prélèvements liés aux épandages d'interfluves occupent le coude supérieur du *pattern*, correspondant aux sédiments charriés par courant tractif et déposés par excès de charge dans un milieu de compétence élevée. Ils relèvent donc bien du mécanisme de la pédimentation, défini par Baulig et cité par Hervieu (1968) à propos des « sables roux continentaux » : le pédiment est modelé par un écoulement qui, constamment à la limite de sa charge, ne peut se concentrer durablement et creuser, mais reste toujours capable d'ablation.

Limites de l'expression empirique des données

La plupart des expressions empiriques de la granulométrie procèdent directement ou indirectement d'une

construction graphique fastidieuse. Lorsque les observations sont nombreuses, la comparaison directe des représentations graphiques propres à chacune d'elle devient impossible.

Quant aux représentations propres à l'échantillon, elles résultent toujours d'une réduction arbitraire de l'information à quelques paramètres représentatifs.

Ces restrictions conduisent à rechercher une méthode qui traite globalement les données sans réduire arbitrairement l'information qu'elles contiennent, et qui exprime synthétiquement les affinités des observations — apparentages et antagonismes — sous une forme d'exploitation aisée.

L'EXPRESSION SYNTHÉTIQUE DES DONNÉES

L'analyse factorielle des correspondances

Les analyses multivariées ont pu être mises en œuvre lors de la mise en service des calculatrices électroniques. Elles s'attachent à déterminer des similitudes entre individus, et prennent en compte globalement la totalité de l'information fournie pour chacun d'eux.

Diverses techniques sont actuellement disponibles : analyses factorielles, nuées dynamiques, classification automatique, etc., (Benzecri, 1973). Elles ont été testées par Hein (1974) sur des comptages de minéraux lourds et des granulométries de sédiments du Bassin Parisien. Pour nos études, relatives au Sud-Ouest de Madagascar, nous avons eu recours à l'analyse factorielle des correspondances (AFC)*.

* Principes de l'AFC. — L'AFC est l'une des méthodes mathématiques les plus propres au traitement informatique des ensembles de données relatifs à de nombreux individus définis par un nombre élevé de variables. Ces données s'inscrivent dans des espaces multidimensionnels qui ne sont pas directement accessibles à l'esprit humain et dont l'exploitation se réduisait naguère à des comparaisons empiriques.

Soit n individus définis par p variables : on peut leur faire correspondre n points-observations dans un espace des variables à p dimensions et, réciproquement, p points-variables dans un espace des observations à n dimensions. L'AFC revient à projeter ces deux espaces associés, sur des axes factoriels hiérarchisés, avec une déformation minimale. La combinaison de ces axes permet de définir des espaces factoriels à dimensions d'ordre peu élevé, représentations simplifiées, directement accessibles, des espaces multidimensionnels. Les distances entre points représentatifs traduisent les degrés de similitude entre individus et les degrés de corrélation entre variables, ou entre individus et variables.

L'AFC s'exprime graphiquement, par la projection simultanée des points-observations et des points-variables, sur des plans définis par la combinaison des premiers axes factoriels pris deux à deux.

A chaque échantillon, constitué à partir d'un certain choix de prélèvements, correspond une matrice de données. Celle-ci est constituée de valeurs (pourcentages pondéraux) relatives, d'une part aux *individus*, c'est-à-dire aux prélèvements, d'autre part aux *variables*, qui sont les classes dimensionnelles.

L'ensemble des valeurs relatives à un individu constitue son *profil*, représenté graphiquement par un *point-observation*. L'ensemble des valeurs relatives à une variable est représenté par un *point-tamis*.

La distribution des points et les distances qui les séparent sont des données propres à l'échantillon traité : la méthode traduit, par une modification de l'espace factoriel et une variation dans la projection des points, toute modification apportée à la matrice. L'interprétation d'un diagramme est donc strictement relative à l'échantillon correspondant.

Principes de la distribution des points

Points-tamis. Pour les sédiments dont la mise en place résulte d'un mécanisme naturel unique, et à l'exclusion de mélanges de stocks, les distributions granulométriques des sables paraissent tendre vers des distributions gaussiennes. Les valeurs pondérales de chacune des classes dimensionnelles successives d'une distribution, loin d'être indépendantes les unes des autres, présentent des affinités, liées à l'ordre de succession des tamis. Ces relations, étendues à l'ensemble des distributions représentées par un échantillon, sont mises en évidence par l'AFC : les points-tamis successifs s'ordonnent le long d'une courbe (courbe des tamis), plus ou moins complexe, anguleuse ou tourmentée selon l'échantillon.

Lorsque dans un échantillon, toutes les observations présentent des distributions assez simples (sous la dépendance d'un seul facteur de tri, ce qui entraîne une distribution voisine de la distribution de Gauss), et suffisamment diversifiées (moyennes réparties également dans toutes les classes), les points-tamis se répartissent sur une courbe régulièrement concave dans le premier plan factoriel, avec concavité tournée vers l'origine des axes.

Points observations. Une telle courbe définit plusieurs domaines où se répartissent les points-observations.

Les points-observations situés dans le domaine central, intérieur à la courbe des tamis, se trouvent à distances à peu près égales de tous les points-tamis. Leurs distributions propres correspondent donc à des valeurs sub-égales des classes dimensionnelles, et par suite à des faciès linéaires.

Les points-observations situés à l'extérieur de la courbe, et excentrés par rapport aux points-tamis les plus proches correspondent à des distributions dans lesquelles une ou plusieurs classes dimensionnelles sont privilégiées par un tri intense, et par suite, à des faciès logarithmiques.

Quant aux points-observations situés sur la courbe ou à proximité, ils correspondent, soit aux faciès en « S », soit à des faciès paraboliques ou hyperboliques, selon qu'ils sont centraux, ou voisins de l'une ou l'autre des extrémités de la courbe.

Analyse des diagrammes expérimentaux de l'AFC

Exploitation d'un échantillon global réduit

Le traitement simultané d'observations trop nombreuses présenterait quelques inconvénients pratiques ; il était donc opportun de constituer un échantillon global réduit : limité en nombre, mais représentatif de l'ensemble. La sélection nécessaire a été obtenue rationnellement, après traitement des 304 observations disponibles réparties en quelques échantillons fractionnés.

La nouvelle matrice étant réduite à 76 individus et 16 variables, les pourcentages d'information recueillis par les premiers axes factoriels à l'issue du traitement sont :

axe 1	46,2 %
axe 2	24,5 %
axe 3	14,8 %

Cet échantillon étant très diversifié, la distribution des points-tamis et des points-observations se rapproche de la distribution théorique et les diagrammes obtenus se prêtent à une interprétation analogue.

Dans l'espace défini par les trois premiers axes factoriels, la courbe des points-tamis est une ligne gauche, relativement régulière bien que brisée (fig. 3).

L'analyse selon le premier axe factoriel fait apparaître un gradient lié aux dimensions des tamis, avec une brusque récurrence au niveau du point-tamis 21. L'analyse, selon le second axe oppose nettement les points représentatifs des tamis de petites dimensions — FDT, 18, 19 — aux autres. Selon le troisième enfin, apparaît une inflexion anguleuse au niveau du point 25. Le dessin de la courbe des tamis est donc jalonné par quatre pôles, coïncidant avec les points-tamis FDT (très petites dimensions), 21 (faibles dimensions), 25 (dimensions moyennes) et 32 (très fortes dimensions) (fig. 4).

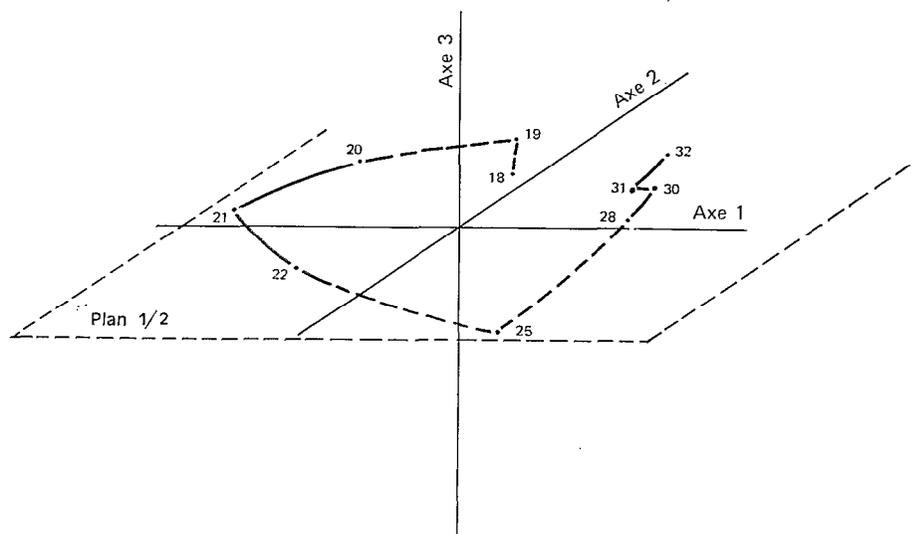


Fig. 3. — Représentation dans l'espace factoriel de la courbe des points-tamis.

Divers domaines significatifs de l'espace factoriel sont donc définis par leurs situations, plus ou moins intérieures, extérieures ou voisines de la courbe des tamis.

Pour les observations correspondantes, ces situations discriminent différentes tendances des distributions, illustrées par différents faciès plus ou moins typiques.

De fait, cinq nuages de points-observations se démarquent dans l'espace factoriel, suffisamment pour qu'on puisse les séparer a priori sur les diagrammes. Ils constituent les ensembles A - BCDE - F - GH et K (fig. 4).

Les courbes cumulatives de quelques observations représentatives, choisies au centre de ces nuages, sont examinées. A chaque nuage ou ensemble de points-observations correspondent des faciès respectivement linéaires (A), paraboliques, plus ou moins dégradés en « S » (BCDE), logarithmiques, à médianes plus ou moins faibles (FGH), et hyperboliques (K).

Une discrimination plus fine de chaque ensemble est obtenue ensuite, par référence aux gisements. Les neuf familles granulométriques définies empiriquement sont ainsi retrouvées et identifiées.

Exploitation d'échantillons partiels

L'exploitation d'échantillons partiels, constitués d'observations de même origine ou de même nature, a permis d'étaler les nuages de points les plus denses

et d'obtenir des discriminations plus fines relatives à des formations telles que les sables de l'Isalo, la couverture des karsts ou les dunes littorales.

LES FAMILLES GRANULOMÉTRIQUES DU SUD-OUEST DE MADAGASCAR

Famille A : faciès linéaires

Un nuage de points-observations occupe sur les diagrammes AFC (*) une position centrale, équidistante des points-tamis. Cette position traduit l'absence de triage des particules. Elle correspond à des histogrammes multimodaux et à des courbes cumulatives de faciès linéaires ou apparentés (fig. 4).

Ces observations se retrouvent également groupées sur le diagramme M/Qd(φ) (fig. 1).

A cette famille correspondent quatre types de gisements.

— Les sols calcimorphes et les horizons profonds de sols rouges décarbonatés sur calcaires : matériaux qui résultent selon toutes apparences de la décarbonatation en place, et héritent de la fraction insoluble des calcaires. Leurs faciès sont typiquement linéaires et dépourvus d'inflexions (fig. 5).

* relatifs à l'échantillon global réduit...

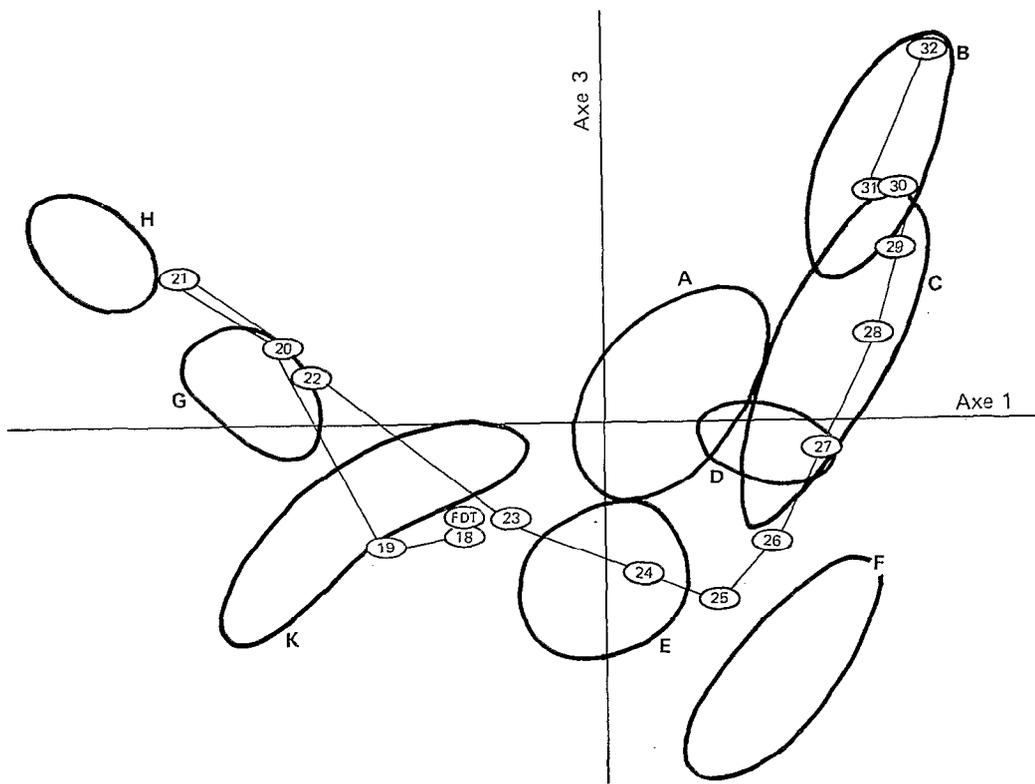
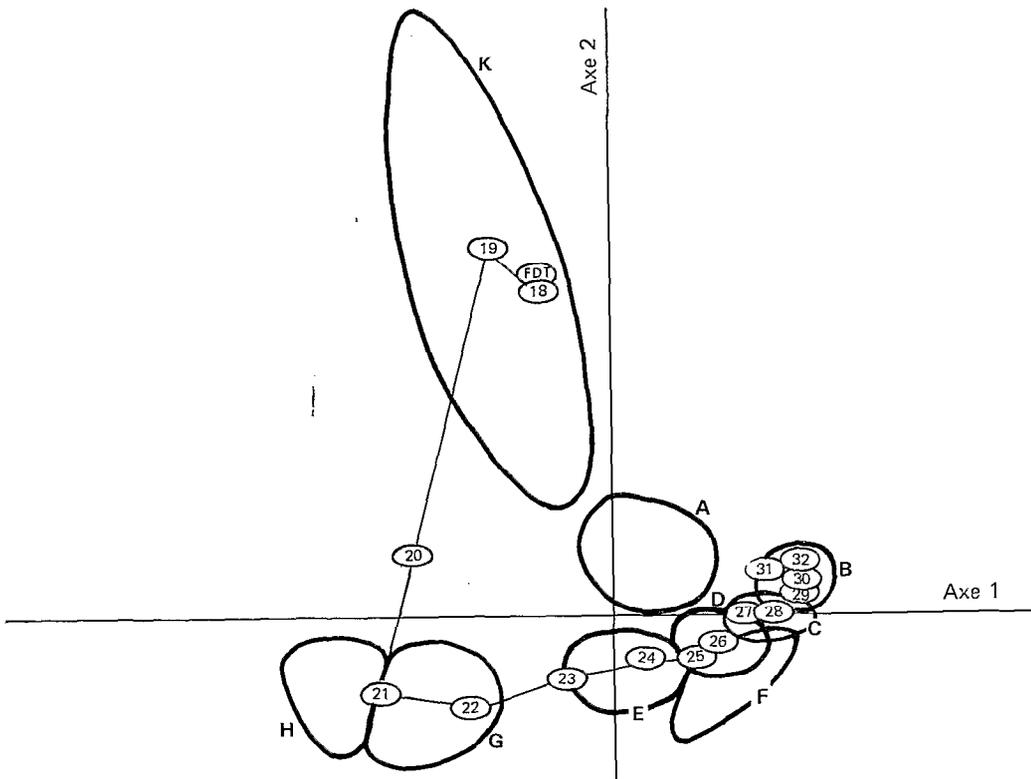


FIG. 4. — Diagrammes AGC : Position des points représentatifs des variables dimensionnelles et des nuages de points-observations.

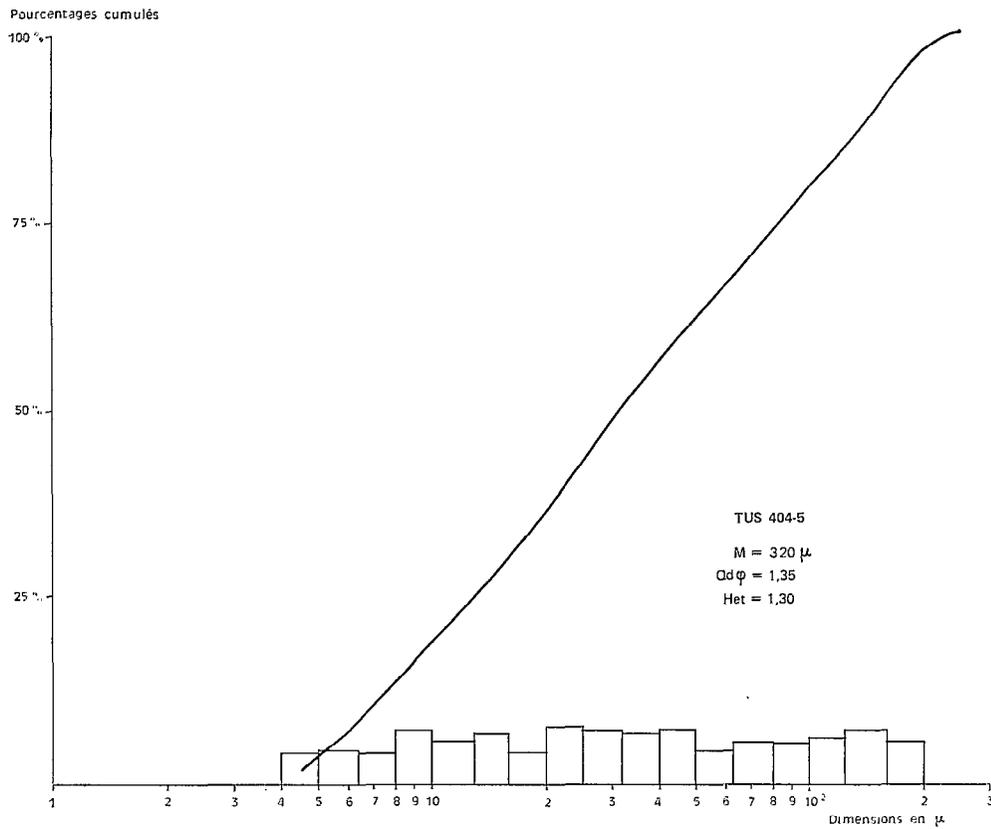


FIG. 5. — Exemple de faciès linéaire. Horizon profond de « sol rouge » sur calcaires crétacés de Vineta.

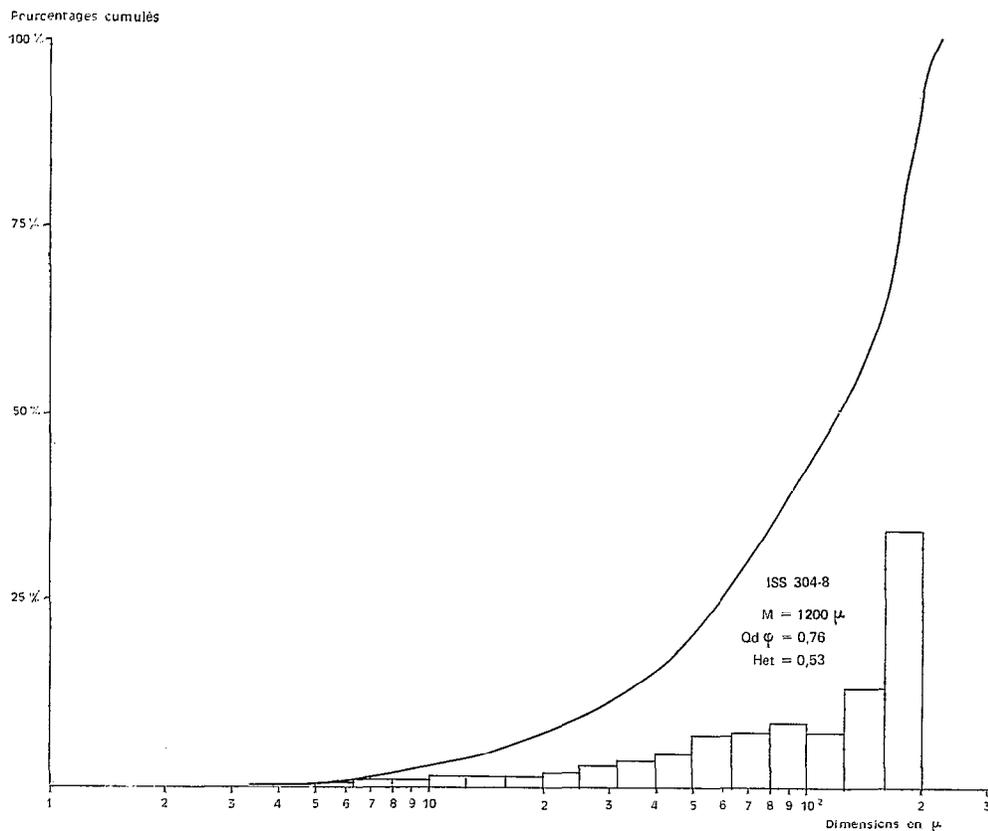


FIG. 6. — Exemple de faciès parabolique typique. Niveau de base des profils de « sables rouges » des glacis de l'Isalo.

— Les sols ferrallitiques présumés en place sur les surfaces d'aplanissement de l'Isalo. Ils sont apparentés à la famille, en dépit d'irrégularités ou de très légères inflexions aux extrémités des courbes ; les histogrammes montrent une diminution des classes dimensionnelles extrêmes, sans pour autant qu'un mode se dessine au sein des classes moyennes.

— Les sols sur basaltes ou sur matériaux d'origine basaltique présumée. Les faciès sont linéaires bien que irréguliers et caractérisés par des valeurs très élevées de $Qd(\varphi)$, (de 1,20 à 1,80).

— Un sol sur leptynites de la région de Bekitro (centre de la péninsule de l'Androy), seul représentant du socle précambrien, fait figure de référence.

Famille B : faciès paraboliques

La position occupée par cette famille sur les diagrammes AFC traduit la nette prédominance des classes de diamètres supérieurs à 500 microns. Elle correspond à des faciès d'allures paraboliques.

Le faciès parabolique n'est en effet typique que pour 1 observation (fig. 6) : l'histogramme correspondant confirme que les effectifs dimensionnels croissent régulièrement depuis les petites dimensions jusqu'à 125 microns puis doublent, jusqu'à 2 mm. Pour d'autres observations, le faciès semble traduire le mélange de 2 stocks, caractérisés respectivement par les modes 500-630, et 1 600-2 000 microns. Pour d'autres encore, la distribution est unimodale, mais dissymétrique par rapport au mode (500-630), au profit des classes grossières.

Cette famille occupe sur le diagramme $M/Qd(\varphi)$ une position marginale en raison de médianes exceptionnellement élevées associées à des indices moyens mais relativement variables.

Les observations les plus typiques de cette famille correspondent à une strate de matériau sablo-argileux, graveleux, rouge, à caractères ferrallitiques, qui surmonte les grès par l'intermédiaire d'une forte stone-line et forme la base de la « carapace sableuse », dans la zone des glacis de l'Isalo.

Quelques observations apparentées proviennent des buttes pliocènes du domaine karstiques, homologues de la « carapace sableuse » de l'Isalo.

Famille C : faciès paraboliques dégradés

Cette famille occupe sur les diagrammes AFC une place étendue qui pénètre le nuage B et englobe partiellement le nuage D qui suivra. Elle est malaisément caractérisée sur la base des faciès et des histo-

grammes car on y trouve toutes les formes intermédiaires entre les courbes paraboliques et les courbes en « S », dotées d'inflexions prononcées et symétriques aux deux extrémités (fig. 7).

Sur le diagramme $M/Qd(\varphi)$ (fig. 1), un ensemble BCD se distingue bien du reste de la distribution mais entre B, C et D, la discrimination est moins nette.

Cette famille réunit tous les matériaux du domaine de l'Isalo, à l'exclusion des sols rouges ferrallitiques des surfaces d'aplanissement (famille A), et de la strate inférieure de la « carapace sableuse » des glacis (famille B). Elle regroupe aussi les « carapaces sableuses » des domaines karstiques et côtiers. On note ici la présence d'observations relatives aux grès et altérites sous-jacents aux sols rouges ferrallitiques.

La famille G rassemble des matériaux à distributions unimodales et bimodales. On remarque parmi celles-ci que divers couples de modes se trouvent constamment associés dans des prélèvements de même origine. Ainsi dans la région d'Andranolava, les modes 400-500 (en microns) et 630-800 ; dans la région de Sakaraha, les modes 315-400 et 630-800 ; dans la région Benenitra-Bezaha, les modes 315-400 et 500-630. Ces couples se retrouvent dans divers gisements très éloignés les uns des autres comme par exemple la région du Zombitsy, les buttes sableuses sur karst et les épandages littoraux.

Famille D : faciès en « S »

Cette famille est presque complètement englobée par la précédente, mais les points qui la composent sont bien groupés. Les histogrammes montrent l'existence de deux modes peu différenciés ; les courbes cumulatives sont régulièrement et symétriquement infléchies (fig. 8).

Sur le diagramme $M/Qd(\varphi)$ leur position se démarque du nuage C en raison d'indices plus élevés (de 0,65 à 1,00).

Il s'agit des « sables roux » alluviaux des terrasses anciennes rubéfiées, du Fiherenana et de l'Onilahy, auxquels s'apparente d'ailleurs un prélèvement du lit actuel du Fiherenana.

Famille E : faciès en « S » avec médianes faibles

Les diagrammes AFC et $M/Qd(\varphi)$ mettent en évidence un nuage bien individualisé par la prédominance de la classe 200-250, correspondant à la médiane. Les histogrammes sont unimodaux ; les courbes cumulatives présentent des inflexions régulières et symétriques : on se rapproche de la distribution

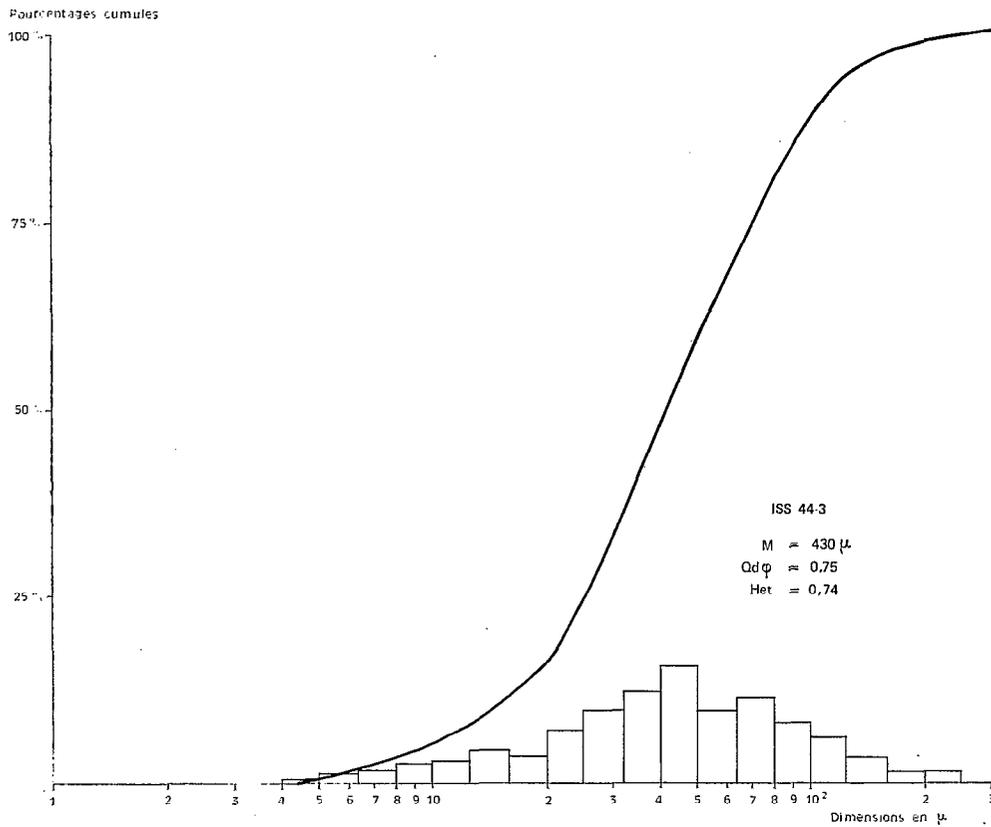


FIG. 7. — Exemple de faciès parabolique dégradé en S. Arène gréseuse de la région d'Andarnolava.

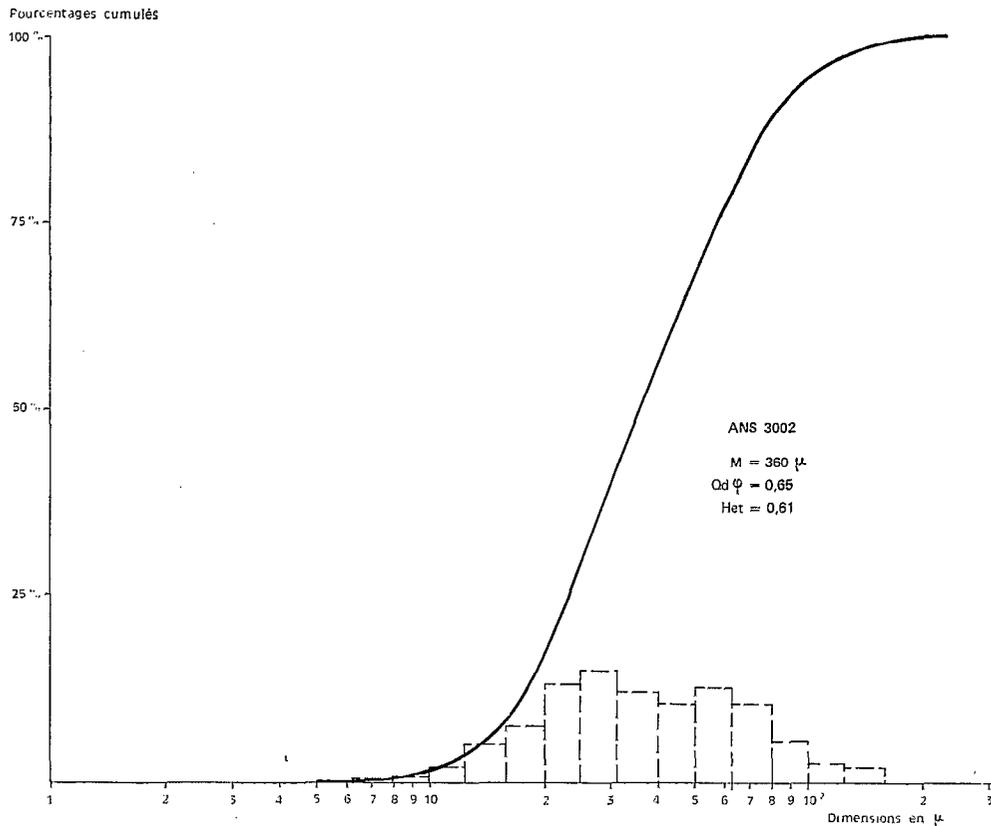


FIG. 8. — Exemple de faciès en S. Prélèvement du lit du Fiherenana au niveau du pont de Belandana.

gaussienne. Les indices de Krumbien sont compris entre 0,50 et 0,80 (fig. 9).

Cette famille regroupe les horizons superficiels de sols rouges des zones karstiques.

Famille F : faciès logarithmiques avec médianes moyennes

Cette famille se détache nettement sur les diagrammes AFC, en position extérieure à la courbe des points-tamis, excentrée par rapport aux points 24, 25 et 26 : les classes dimensionnelles comprises entre 200 et 400 microns sont donc privilégiées. Les histogrammes en effet présentent une forme en cloche mais la distribution s'étale encore largement sur les 5 ou 6 classes voisines ; de même les courbes cumulatives, fortement redressées, tendent vers le faciès logarithmique, mais leurs extrémités sont encore mollement infléchies (fig. 10).

Sur le diagramme M/Qd(ϕ), cette famille est bien distincte des précédentes mais l'on passe insensiblement aux suivantes ; les médianes sont relativement élevées tandis que les indices sont faibles (0,32 à 0,52).

Elle regroupe d'une part les sables roux dunaires anciens de la région d'Antseva-Ankililoaka, et un prélèvement de référence originaire d'Amboasary (grande dune rubéfiée de l'extrême-sud).

Elle regroupe d'autre part tous les sables roux de la région de Tuléar prélevés superficiellement au nord du Fiherenana, ainsi que de quelques gisements situés au sud de ce fleuve mais en retrait par rapport à la mer et en profondeur. Ces observations sont apparentées par le faciès mais légèrement décalées par rapport aux médianes.

Famille G : faciès logarithmiques à tendances hyperboliques avec médianes faibles

Sur les diagrammes AFC, cette famille voisine avec les points 20, 21 et 22 qui jalonnent la principale angulation de la courbe des tamis. La classe 100-125 est en effet privilégiée ainsi que les classes immédiatement voisines (de 80 à 200). Les courbes sont nettement redressées, surtout du côté des fractions fines tandis qu'elles s'infléchissent du côté des grossières, en une tendance hyperbolique. Les histogrammes marquent la dominance de 3 classes dimensionnelles sans que la classe modale soit très prééminente (fig. 11).

Cet ensemble réunit les « sables roux » éoliens et les cordons littoraux non rubéfiés de la plaine de Tuléar. Pour les « sables roux », il s'agit de formations d'âge aepyornien situées en retrait par rapport au rivage actuel.

Famille H : faciès logarithmiques typiques

Cet ensemble, bien individualisé sur les diagrammes AFC et excentré par rapport au tamis 21, laisse prévoir un fort triage au bénéfice de la classe 100-125. Les histogrammes montrent en effet que trois classes dimensionnelles se partagent 90 % de la distribution avec une nette prééminence pour la classe modale, qui représente plus de 50 %. Les courbes cumulatives sont très redressées et peu infléchies (fig. 12).

Il s'agit de sables « roux-clairs » ou « beiges » de l'Aepyornien récent ou de la période actuelle, dont le modelé dunaire est très accusé.

On retrouve aussi dans cet ensemble les résidus de décarbonatation expérimentale de quelques calcaires tertiaires.

Famille K : faciès hyperboliques

Cette famille occupe sur les diagrammes AFC une position marginale, associée aux points représentatifs des plus faibles classes dimensionnelles. Histogrammes et courbes cumulatives sont typiques, la large inflexion correspondant aux dimensions grossières contrastant avec l'absence d'inflexion du côté des fines (fig. 13).

Il s'agit de sols rouges de décarbonatation, non contaminés, prélevés dans les dolines du plateau Mahafaly et aussi de certains résidus de décarbonatation expérimentale. Certaines observations, de faciès intergrade linéaire-hyperbolique, correspondent à des matériaux de décarbonatation en place.

INTERPRÉTATION MORPHO-PÉDOLOGIQUE

Matériaux de l'Isalo et des « carapaces sableuses »

Le milieu

Le groupe stratigraphique de l'Isalo correspond à une période de sédimentation détritico continentale par phases contrastées et violentes, comme le montre la fine stratification entrecroisée et la texture grossière des grès. A partir d'un niveau d'aplanissement méso-tertiaire, l'érosion a dégagé un massif ruiniforme et des glacis ; les sédiments corrélatifs ont couvert non seulement ces glacis mais les interfluves des domaines karstiques et côtiers, en aval.

Sur les surfaces d'aplanissement, une altération ferrallitique affecte les grès sur plus de 25 m d'épaisseur et s'exprime par des altérites blanches surmontées de sols rouges.

Sur les glacis, les grès sont fossilisés par les « carapaces sableuses » qui comportent plusieurs épandages

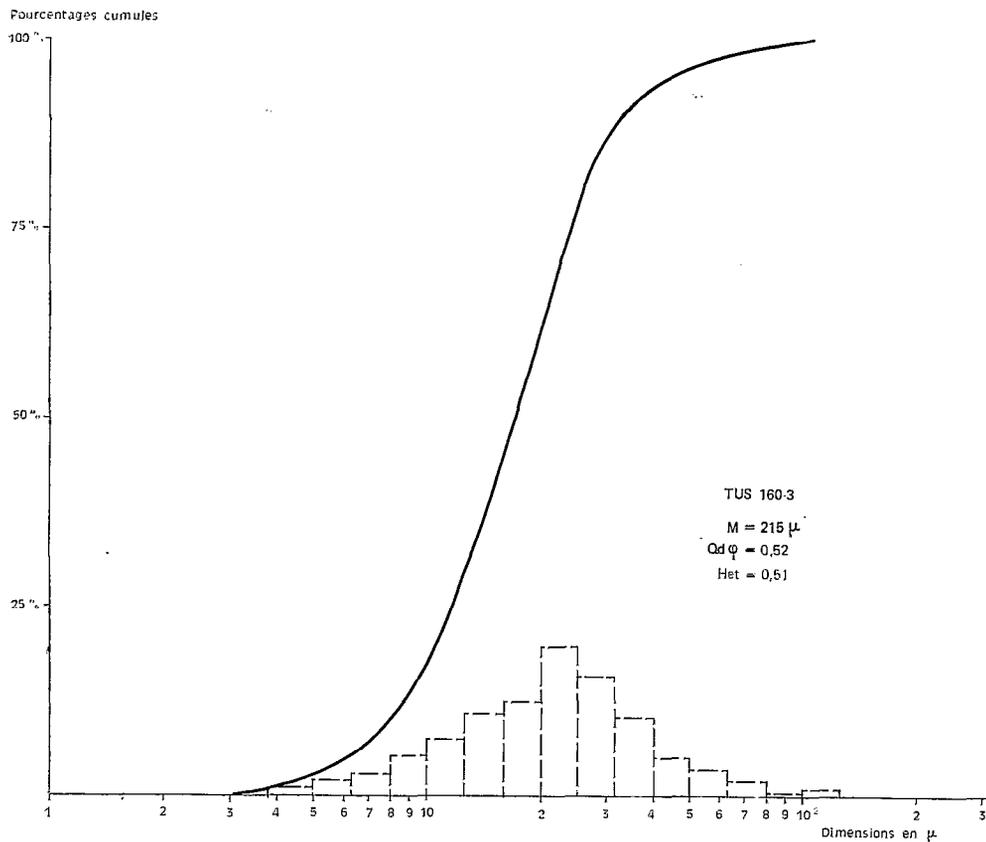


FIG. 9. — Exemple de faciès en S typique avec histogramme unimodal. Horizon superficiel de « sol rouge » du karst de Belomotra sur calcaires éocènes.

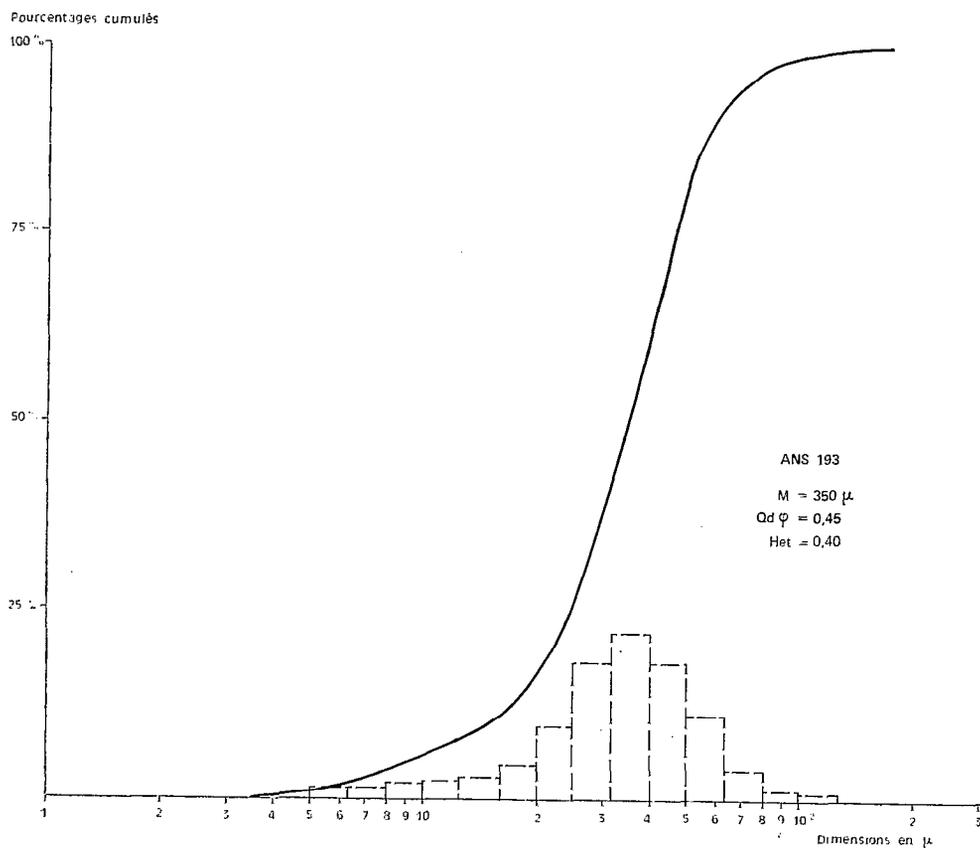


FIG. 10. — Exemple de faciès à tendance logarithmique. Sable roux dunaire de la région d'Antseva.

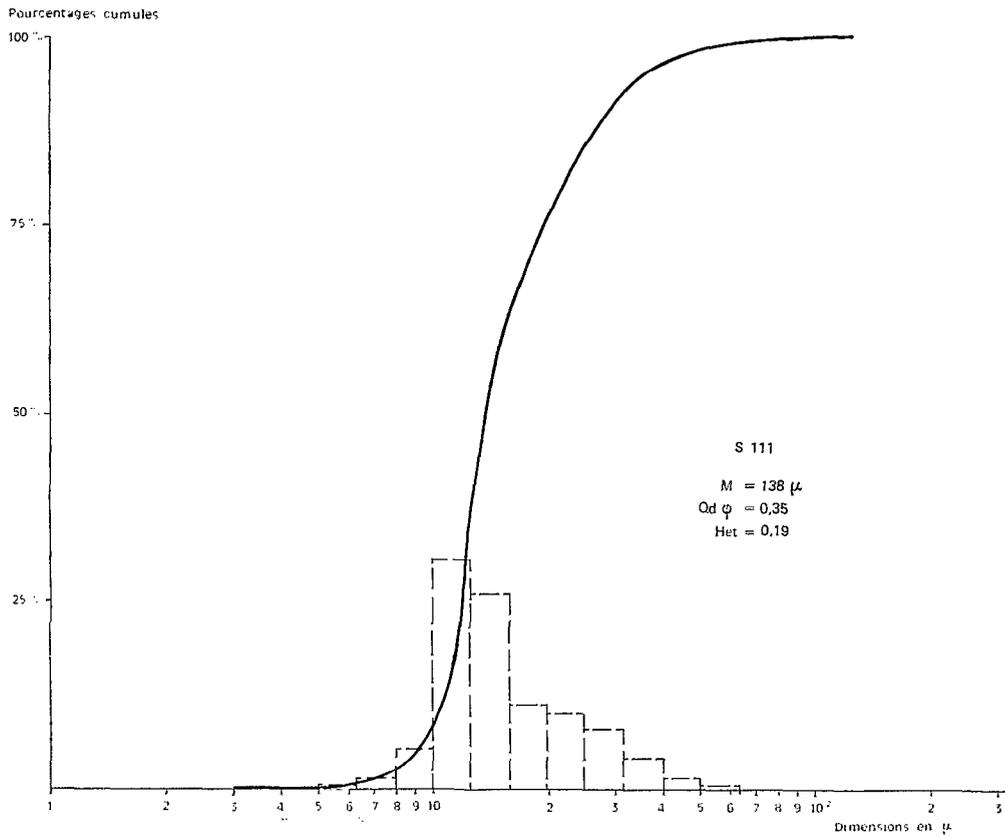


FIG. 11. — Exemple de faciès logarithmique à forte tendance hyperbolique, unimodal avec médiane faible.

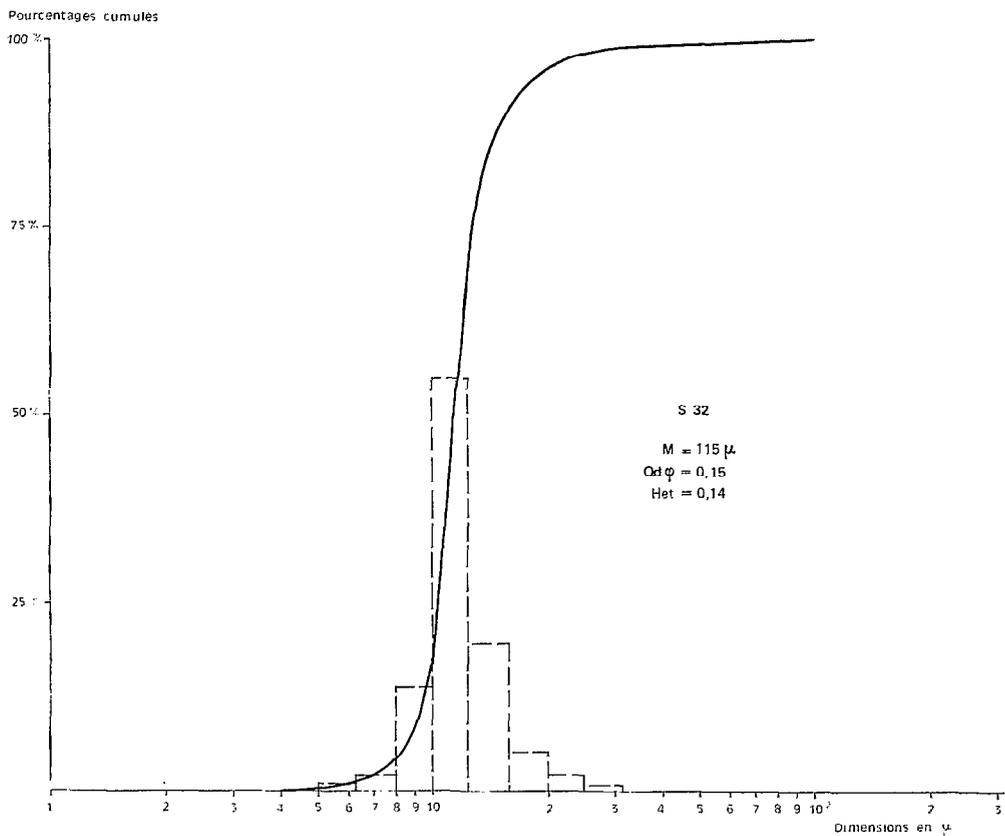


FIG. 12. — Exemple de faciès logarithmique. Sables dunaires roux-clairs de Tuléar.

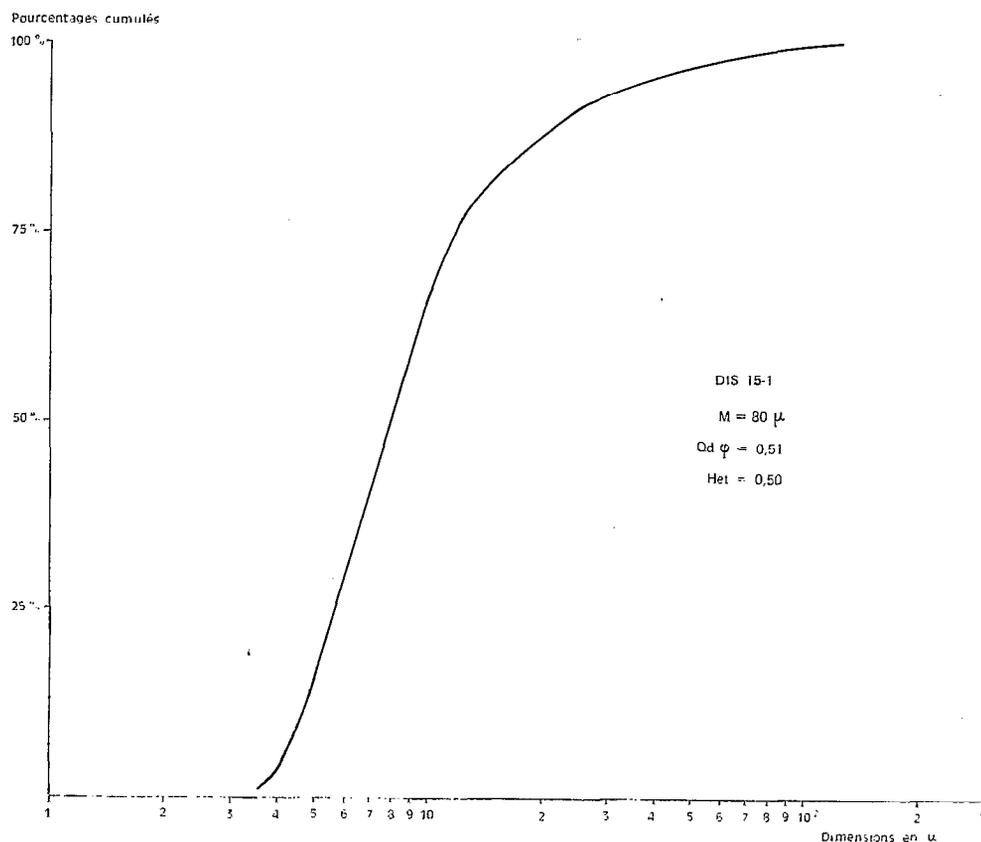


FIG. 13. — Exemple de faciès hyperbolique. Sol rouge de doline de la région des « clairières mahafaly ».

sablo-argileux faiblement ferrallitisés, séparés par des stone-lines. L'épandage de base est présumé pliocène ; les autres constituent les « sables roux ». Les « carapaces sableuses » des domaines de l'aval sont analogues.

Les résultats granulométriques

Les horizons rouges des sols ferrallitiques des surfaces d'aplanissement (famille A), et l'épandage de base des « carapaces sableuses » (famille B) se distinguent de tous les autres matériaux, y compris les altérites et grès représentés dans la famille C.

De plus, le traitement (AFC) d'un échantillon partiel, représentatif du seul domaine de l'Isalo, permet d'étaler les points de la famille C. Les grès et altérites dont les faciès montrent encore une tendance linéaire se démarquent des « sables roux »

isaliens dont les faciès sont plus symétriques et plus encore des « sables roux » des domaines de l'aval dont les courbes se redressent et dont les médianes diminuent.

Discussion

Paradoxalement, les horizons rouges des sols ferrallitiques à faciès linéaires sont moins triés que les grès et altérites sur lesquels ils sont développés. Leur hétérométrie n'est donc pas intrinsèquement liée à leur caractère autochtone et on ne peut l'interpréter de la même façon qu'en milieu éruptif ou métamorphique (Sourdat et Delaune, 1970).

En effet, les prélèvements de grès et d'altérites sont ponctuels et ne représentent que quelques lits de sables et de galets. Les horizons rouges par contre héritent d'un grand nombre de strates, décomposées

et homogénéisées par remaniements pédogénétiques et biologiques. Il est plausible que le cumul de stocks originellement homométriques restitue un stock final hétérométrique.

D'autre part l'examen en lames minces montre que les quartz sont partiellement calibrés et sains dans les grès ; ils sont très fortement fissurés dans l'altérite tout en restant en place au sein de cette matrice kaolinisée ; ils éclatent et sont dispersés au niveau des horizons rouges. Ce mécanisme pourrait contribuer à la dispersion granulométrique des stocks.

Fauck (1972) était parvenu à une conclusion contraire en montrant que la distribution granulométrique de certains sols rouges, sur sables et sur grès de l'Afrique de l'ouest, se resserrait dans les horizons superficiels, par rapport à celle de la roche-mère. Il n'est pas certain cependant que les conditions soient comparables car les sols des surfaces tabulaires de l'Isalo ont la particularité d'être très fortement ferrallitisés et remaniés sur place, sans transport.

Filiations granulométriques

Entre les grès et les matériaux qui en dérivent, on peut envisager deux filiations.

L'une conduit, par altération intense sans transport, des grès (triés) aux sols ferrallitiques (non triés). L'autre, par transports répétés avec altération modérée, conduit d'abord à l'épandage de base de la carapace sableuse (parabolique) puis aux divers « sables roux » (tendance symétrique).

Les épandages de glaciis étant propices à une parfaite homogénéisation, il est remarquable que les histogrammes fassent toujours apparaître une distribution bimodale. Le plus étonnant n'est pas qu'il y ait deux stocks mêlés, mais qu'il y ait, partout, deux stocks et que les mêmes soient appariés.

Les rapprochements granulométriques établis entre les matériaux de couverture de l'Isalo, des karsts et de la plaine côtière manifestent le rôle primordial de l'Isalo comme source des formations détritiques de l'aval.

Le domaine karstique

Le milieu. Les plateaux karstiques ont été partiellement fossilisés par des carapaces sableuses dont il reste quelques témoins bien individualisés (Sourdat, 1970). On trouve donc côte à côte des sols en place, sur ces matériaux sableux, des sols en place sur calcaires, et des sols associés aux calcaires dont les matériaux peuvent provenir à la fois de la décarbonatation et des carapaces sableuses.

Certains dépôts de matériaux d'origine basaltique doivent aussi être pris en considération.

Les résultats granulométriques. Les sols calcimorphes et les horizons profonds des sols rouges (famille A) se démarquent des « carapaces sableuses » (famille C) et des horizons superficiels des sols rouges (famille E). Les sols d'origine basaltique présumée se regroupent aussi dans la famille A.

Les sols rouges associés aux calcaires sont donc bien polygéniques comme l'indiquent par ailleurs les observations pédologiques et minéralogiques. Ces discriminations et regroupements sont mis en valeur par le traitement d'un échantillon partiel, représentatif de ce domaine.

Cependant, les résidus de décarbonatation expérimentale et les sols des dolines se retrouvent au sein des familles H et K.

Discussion

Il n'est pas surprenant que les squelettes quartzeux de calcaires marins tels que ceux du Crétacé et de l'Eocène malgaches présentent des faciès logarithmiques ou hyperboliques, qui évoquent le transport et la décantation des particules. Par contre, il est à première vue paradoxal de constater que la granulométrie des horizons profonds des sols rouges ou celle des sols calcimorphes ne reflètent absolument pas ce caractère homométrique accentué des matériaux qu'ils surmontent et dont ils sont censés dériver. Leurs faciès en effet sont très typiquement linéaires.

Il se confirme donc qu'en milieu sédimentaire, l'hétérométrie de certains sols n'est pas intrinsèquement liée à leur caractère autochtone ni à la granulométrie des strates de leurs substrats.

Le poids des résidus de décarbonatation est souvent très faible (moins de 5 %) et la genèse d'un sol implique soit la dissolution de très nombreuses strates calcaires, soit la participation [de sables allochtones : dans l'un et l'autre cas, les stocks propres à chaque strate calcaire ont lieu d'être « dilués » au contact d'autres stocks. L'étude minéralogique menait à la même remarque.

Filiations

Entre les matériaux gréseux de l'Isalo, les diverses carapaces sableuses et les sols polygéniques des karsts, la modification des courbes cumulatives par diminution progressive des médianes et des indices d'hétérométrie suggère une filiation. Les histogrammes sont néanmoins d'une interprétation malaisée. Il est en

effet surprenant que la distribution des sols polygéniques des karsts soit unimodale tandis que les matériaux dont ils sont censés hériter sont constamment bimodaux. On hésite à reconnaître dans cette sélection d'un mode unique, l'effet d'un cumul, ou celui d'une sélection d'ordre pédogénétique.

Le domaine littoral

Le milieu. Le domaine littoral est constitué d'un glaciais d'épandage, analogue au carapaces sableuses, et d'une frange dunaire au travers desquels s'emboîtent divers formations alluviales. Au sud de la Manombo et plus encore au sud du Fiherenana, la frange dunaire se substitue presque complètement au glaciais.

Vers le littoral convergent donc des matériaux continentaux, des matériaux d'origine continentale repris par la mer, et des matériaux d'origines continentales ou marines repris par le vent.

Les sables dunaire roux et beiges représentent des dépôts successifs, d'âge aepyornien ou actuel, qui se sont fossilisés les uns les autres et ont été décarbonatés et rubéfiés à divers degrés. Leur modelé est parfois nettement éolien, parfois hydraulique, et souvent indéterminé.

Résultats granulométriques. Les sables roux du glaciais d'épandage de la région d'Antseva sont apparentés à tous les autres sables roux continentaux (famille C). Ceux des terrasses alluviales rubéfiées sont regroupés (famille D). Les matériaux dunaire se répartissent entre 3 autres nuages bien distincts (famille F, G et H) (fig. 4).

L'exploitation (AFC) d'un échantillon partiel, restreint à ces trois dernières familles en donne une image diversifiée et élargie (fig. 14).

Le nuage Q (fig. 14) représente l'étalement du nuage F (fig. 4). Les faciès logarithmiques à fortes médianes des observations correspondantes évoquent l'action d'un agent puissant, appliquée à un matériau grossier préalablement trié. Ce groupement correspond aux dunes anciennes rubéfiées de la région d'Antseva et des régions de Belalanda, Tsongoritelo et Ifaty. Bosser et Hervieu (1958), avaient déjà signalé le caractère « mixte » de ce type de sables qui pourrait résulter de l'éolisation superficielle du glaciais d'épandage ou de sables fluviatiles. L'origine continentale de l'ensemble dunaire, de modelé indécis, qui s'étend au nord du Fiherenana se voit donc confirmée ; l'étude minéralogique menait en effet à la même conclusion.

Les nuages R, S, T, V et W représentent l'étalement

des familles G et H. Il s'agit là des formations dunaire situées au sud du Fiherenana. La dispersion des points sur le diagramme (fig. 14) de droite à gauche selon l'axe I, traduit un triage croissant exprimé par des faciès de plus en plus nettement logarithmiques, avec des médianes inférieures à 0,2 mm et des indices $Qd(\varphi)$ compris entre 0,70 et 0,19. On passe ainsi graduellement des dépôts les plus anciens, situés en positions inférieures ou profondes, aux dépôts les plus récents, situés en positions littorales ou superficielles.

Les nuages R et S regroupent les sables dunaire anciens (roux-rouges), de la rive sud et leur base calcaire. Ils sont encore proches du nuage Q et les courbes cumulatives correspondantes sont encore infléchies en « S », avec une légère tendance parabolique. A ce titre on pourrait assimiler ces sables à ceux de la rive nord et penser qu'ils résultent de l'éolisation des épandages continentaux d'interfluves. Cependant, la présence d'un cortège minéralogique à hornblende, pyroxène et grenat a montré péremptoirement qu'il s'agissait de sables d'origine fluviatile, apparentés à ceux de l'Onilahy.

Le nuage R comprend une observation de référence, correspondant aux sables roux-rouges qui fossilisent la falaise calcaire d'Itampolo sur le littoral mahafaly.

Les sables « roux-foncés » de l'Aepyornien moyen et leur base calcaire, groupés en T et V se trouvent par contre très proches d'observations relatives aux cordons littoraux sub-actuels d'Ankoronga. Cette affinité, et l'inflexion d'allure hyperbolique des courbes correspondantes pourrait traduire l'origine plus nettement marine de cette deuxième génération de matériaux, superficiellement éolisés.

Les sables « roux-clairs » et « beiges » de l'Aepyornien récent et des formations actuelles présentent des caractères éoliens typiques, en rapport avec un modelé de dunes vives : ils se regroupent dans le nuage W.

On constate donc, en passant des formations dunaire les plus anciennes, situées en position continentale, aux plus récentes situées en position littorale, que les caractères granulométriques de l'éolisation sont de plus en plus marqués et tendent à effacer les caractères hérités de phases antérieures de sédimentation, continentales ou marines.

On note en outre que les limites des horizons pédologiques décarbonatés et rubéfiés sont indépendantes des limites granulométriques qui sont d'ordre stratigraphique.

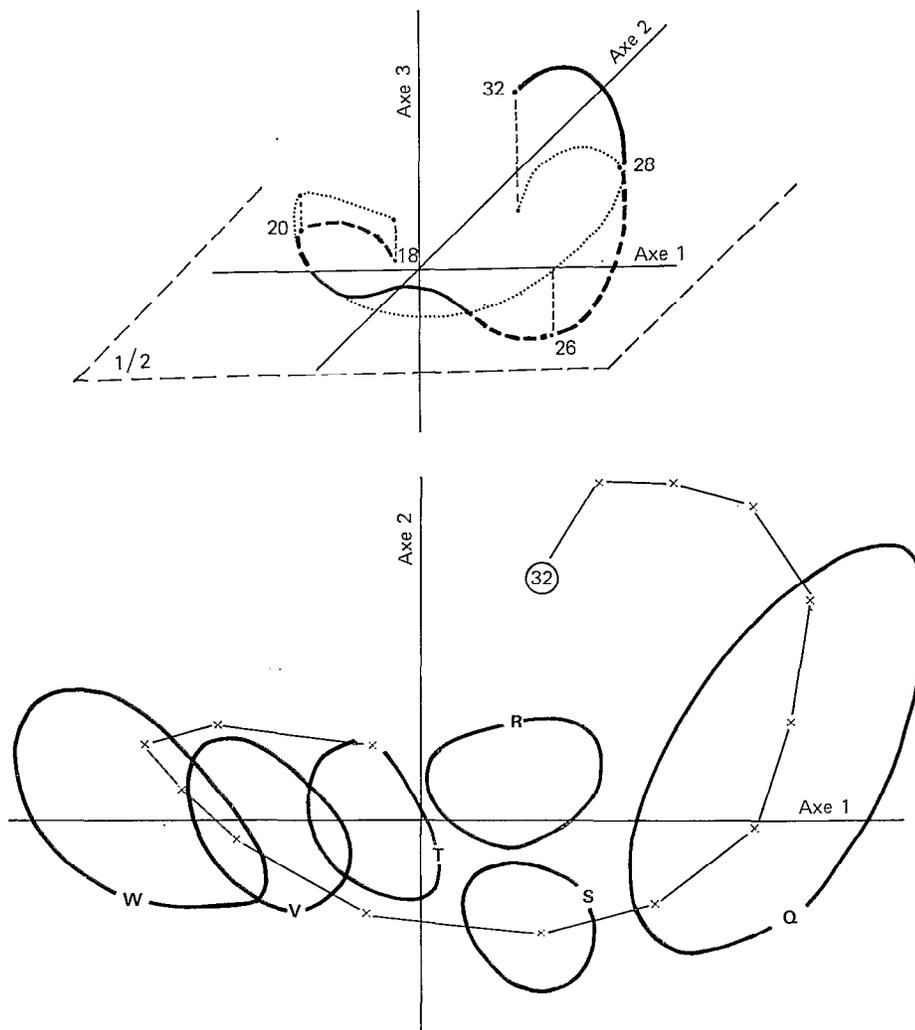


FIG. 14. — Résultats de l'AFC relatifs aux sables dunaires. Représentation de la courbe des points-tamis dans l'espace factoriel. Projection de la courbe et des nuages-observations sur le plan 1/2.

CONCLUSIONS

Les expressions classiques des données granulométriques, telles que les histogrammes et les courbes cumulatives, peuvent être interprétées grâce à la notion de faciès, mais leur construction est fastidieuse, et la manipulation de figures trop nombreuses prêterait à des regroupements arbitraires. Le recours à des diagrammes de classement basés sur l'emploi de paramètres n'évite pas la lenteur des constructions préalables ni l'arbitraire du choix des paramètres.

L'analyse factorielle des correspondances offre aux études granulométriques une approche nouvelle, car elle prend en compte l'ensemble de l'information contenue dans les données et en extrait une expression graphique, synthétique et objective.

Les points représentatifs des observations et des classes dimensionnelles sont répartis sur les diagrammes AFC en fonction de leurs affinités mutuelles ; on peut donc circonscrire des groupements d'observations et leur attacher une signification. Celle-ci pourra être illustrée par quelques graphiques classiques,

relatifs aux observations les plus représentatives, choisies au centre de leurs nuages respectifs.

Cette technique fournit, sans préliminaires, une image globale et interprétée de l'échantillon. Utilisée en première approche de l'étude, elle constitue un outil précieux.

Les discriminations et affinités d'ordre granulométrique mises en évidence par l'étude des matériaux superficiels au sud-ouest de Madagascar résolvent divers problèmes de filiation sédimentaire ou pédologique, d'intérêt local. Elles révèlent en outre l'originalité des séquences granulométriques propres aux milieux sédimentaires tropicaux.

En effet, si l'on ne considère que les matériaux superficiels meubles, on peut concevoir une séquence évolutive simple : en amont se trouvent des sols autochtones, parfaitement hétérométriques, tandis que vers l'aval se différencient des matériaux de plus en plus homométriques, triés par l'effet du transport.

Mais si l'on considère les substrats gréseux et calcaires, on constate qu'il s'agit de dépôts, dont chaque strate est originellement homométrique. Les

sols autochtones ne représentent donc pas le véritable point de départ de la séquence granulométrique : ils n'en sont qu'un point singulier, au niveau duquel un stock hétérométrique se trouve reconstitué, à partir de stocks originaux homométriques.

L'hétérométrie des sols formés sur grès ou calcaires n'est pas intrinsèquement liée à l'hétérométrie du substrat comme en milieu éruptif ou métamorphique.

Il est vraisemblable que le triage originel des stocks de galets et de sables propres à chaque strate est détruit par deux mécanismes convergents. D'une part, chaque classe dimensionnelle est fragmentée, par corrosion, en éléments de dimensions quelconques. D'autre part les stocks sont mélangés entre eux.

REMERCIEMENTS

Les données informatiques ont été préparées par le Bureau de calcul de l'ORSTOM et traitées par l'Atelier d'Informatique des Universités de Paris, que nous remercions.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 31 janvier 1975

BIBLIOGRAPHIE

- BENZECRI (J.P.), 1973. — L'analyse des données. II. L'analyse des correspondances. Paris, Dunod.
- BOSSER (J.), HERVIEU (J.), 1958. — Notice sur la carte d'utilisation des sols de la plaine de Tuléar. IRSM Tananarive, 44 p., *multigr.*
- CAILLEUX (A.), TRICART (J.), 1959. — Initiation à l'étude des sables et des galets, t. I. CDU Paris.
- FAUCK (R.), 1972. — Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Paris, *Mémoires ORSTOM*, n° 61.
- 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.), 1968. — Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. Thèse doct. ORSTOM, Paris, *Mémoire* n° 24. 465 p., bibliogr. et photos.
- PASSEGA (R.), 1963. — Analyses granulométriques. Outil géologique pratique. *Rev. IFP*, t. XVIII, n° 11 : 1489-1499.
- RIVIÈRE (A.), 1952. — Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Indices caractéristiques et interprétation géologique. Notion de faciès granulométrique. *BSGF*, 6^e sér. II, : 156-167.
- 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.), DELAUNE (Mme M.), 1970. — Contribution à l'étude des sédiments meubles grossiers du littoral guyanais. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 1 : 81-97, 17 fig., bibliogr. (16 réf.).
- SOURDAT (M.), 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., tabl., bibliogr. (11 réf.).
- SOURDAT (M.), MAHE (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. Sc. Paris*, t. 279 (16 déc. 1974), Série D, : 1845-1848.
- SOURDAT (M.), MAHE (J.), 1975. — Etude granulométrique par l'analyse factorielle des correspondances : application aux sables des formations superficielles du Sud-Ouest de Madagascar. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 280 (21 mai 1975), Série D, : 2207-2210.
- SOURDAT (M.), MAHE (J.), 1975. — Exploitation des comptages de minéraux lourds par l'analyse factorielle des correspondances. Application aux formations superficielles du sud-ouest de Madagascar. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.* Vol. VII, n° 1 : 39-63.
- WEYDERT (P.), 1973. — Morphologie et sédimentologie des formations récifales de la région de Tuléar. SW de Madagascar. Thèse doct. Sc. Nat. Univ. Aix-Marseille. *Multigr.* 646 p. et 1 annexe, 80 p.